

第2版

热处理技术 数据手册

Rechuli Jishu Shuju Shouce

樊东黎 徐跃明 佟晓辉 主编



● ISBN 7-111-18547-1/TG·1620

● 策划：张秀恩 王兴垣 / 封面设计：张静

上架指导：工业技术 / 材料工程 / 金属材料

ISBN 7-111-18547-1



9 787111 185475 >

定价：118.00 元

编辑热线：(010)88379732

地址：北京市百万庄大街22号

邮政编码：100037

联系电话：(010) 68326294

网址：<http://www.cmpbook.com>

E-mail:online@cmpbook.com

热处理技术数据手册

第2版

樊东黎 徐跃明 佟晓辉 主编



机械工业出版社

本书的内容是与热处理有关的技术数据。其中包括基础,国内外金属和合金的命名法,金属材料的化学成分,热处理工艺规范,热处理后的力学性能,加热和冷却方式,各种热处理和化学热处理原理与工艺,表面沉积涂层技术,量大、面广机器零件、制品的热处理工艺及效果,质量检测和控制技术,计量单位和换算、热处理标准等。

本手册可供热处理生产第一线的工程师、技师、质检人员在优选工艺、预见性能、完善管理工作中使用,也可供科研设计人员在零件失效分析、产品开发设计、技术创新中应用,以及高校、职高、中专和技校师生在教学、科研中参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

热处理技术数据手册/樊东黎等主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 2006.4

ISBN 7-111-18547-1

I. 热… II. 樊… III. 热处理-数据-手册 IV. TG15-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 011618 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:张秀恩 王兴垣 责任编辑:王兴垣 版式设计:冉晓华

责任校对:李秋荣 封面设计:张 静 责任印制:杨 曦

北京机工印刷厂印刷

2006 年 4 月第 2 版第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·72.75 印张·2 插页·1901 千字

0 001—4 000 册

定价:118.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

编辑热线 (010) 68351729

封面无防伪标均为盗版

风神整理

免费电子书共享群: 208139770 / 280723218

(此水印可通过Adobe Acrobat删除)

第 2 版前言

《热处理技术数据手册》第一版出版至今已经有 5 年了。尽管因编写仓促，有不少缺陷、遗漏和差错，但仍受到读者青睐，多次印刷，顷刻销售罄尽。鉴于科技进步日新月异，对外交流日益频繁，为弥补第 1 版手册的不足、修正编写、选材和印刷错误，增添先进工业国家最新图表数据，应出版社要求，原版编者对一版手册进行了补充修订。

第 2 版手册的重要改动和增补是：

1. 把“钢铁热处理基础”一章分为“材料化学成分”、“基础”和“数据”三章，便于读者查找。

2. 增加“金属和合金材料牌号表示方法”一章。除国产材料外，尚引有英、美、日、德、法、俄、韩等国和国际标准化组织的材料牌号表示方法以及中外牌号对照，以满足日益增长的对外交流的需要。

3. 在“钢热处理基本数据”一章中增添了“钢淬火回火后的力学性能”一节。本节对于钢常规热处理效果和根据零件性能要求选择钢材和制订热处理规范至关重要。

4. 在“金属热处理的加热和冷却”一章中补充了“在气氛和真空中加热”两部分，这是近代热处理技术不可或缺的部分。

5. 在附录的“通用数据中补充了国内外学术团体、标准化组织、专业、环境、安保、国家管理部门名称缩写的含义，计量单位和换算，特别是列入了材料各种缺口试样冲击功和冲击韧度的换算。这在过去被认为是根本不可能或不推荐的事。

6. 在各种材料成分、热处理工艺和各类零件热处理各章中也都适当补充了不少近代热处理新技术数据，体现了热处理技术的增新和进步。

负责组织和参与本书修订的是樊东黎、徐跃明和佟晓辉，参加数据搜集、整理、审核的有吴颖思、王德文、曹敏达、李福臣、周莉、贾洪艳、邵周俊、马兰、刘西鹰、葛京晶、杜秀轩、赵慧敏、罗晨光、樊尔青、哈红、郑仲瑜、崔敬丽、胡小丽、李爱国、李俏等。

出版社责任编辑王兴垣同志在书稿编辑、审理、校样、编排，特别在材料化学成分、性能要求的新标准查找核对上下了功夫，做了大量工作。此外尚有多人参加了本书的誊写、打印、描图等工作、编者在此一并致谢。

在 2 版修订过程中，编者虽力求改正第 1 版中的错误，但难免还有遗漏，在补充的内容和数据中有可能再次出错，欢迎读者批评指正。

编 者

目 录

第 2 版前言

第 1 章 元素的物理化学性质 1

- 1.1 化学元素周期表 1
- 1.2 化学元素的物理化学性质 4
- 1.3 常见无机化合物的物理化学性质 8
- 1.4 常见有机化合物的物理化学性质 11

第 2 章 钢铁热处理基础 12

- 2.1 Fe-C、Fe-Fe₃C 合金相图 12
- 2.2 合金元素对 Fe-Fe₃C 合金相图的影响 17
- 2.3 钢中碳化物结构和性质 22
- 2.4 合金元素对钢组织、热处理工艺、力学性能、物理性能、化学性能和加工工艺性能的影响 23
- 2.5 钢在加热过程中的转变 28
- 2.6 钢的过冷奥氏体等温转变和连续冷却转变类型 36
- 2.7 淬火钢在回火过程中的转变 38
- 2.8 钢的淬透性 41

第 3 章 金属和合金材料牌号表示方法及世界主要国家常用钢和合金牌号相似对照 52

- 3.1 国产钢钢号命名法 52
- 3.2 国产铸铁牌号表示方法 56
- 3.3 国产非铁金属和合金的代号及表示方法 58
- 3.4 国家名称代号和标准名称代号 60
- 3.5 法国 NF 标准钢号表示方法 61
- 3.6 德国 DIN 标准钢号表示方法 64
- 3.7 美国 AISI 和 SAE 标准钢号表示方法 67
- 3.8 日本 JIS 标准钢号表示方法 70
- 3.9 俄罗斯 ГОСТ 标准钢号表示方法 76
- 3.10 国际标准化组织 (ISO) 钢号表示

方法 78

- 3.11 英国 BS 标准钢号表示方法 81
- 3.12 韩国 KS 标准钢号表示方法 83
- 3.13 世界主要国家铸铁牌号表示方法 84
- 3.14 中国和世界主要国家常用钢和合金牌号相似对照 87

第 4 章 金属和合金材料的化学成分和性能 96

- 4.1 国产常用钢种化学成分 96
- 4.2 国产钢材物理化学性质 115
- 4.3 常用钢临界温度、锻造温度、热处理工艺参数 117
- 4.4 常用钢力学性能技术要求 123
- 4.5 非铁金属和合金的化学成分 126
- 4.6 功能合金的化学成分 139
- 4.7 各国特殊用途合金相似对照 148

第 5 章 钢热处理基本数据 152

- 5.1 钢的过冷奥氏体等温转变图 152
- 5.2 钢的过冷奥氏体连续冷却转变图 166
- 5.3 常用钢的淬透性曲线 175
- 5.4 淬火、回火钢的力学性能 198

第 6 章 金属的加热和冷却 237

- 6.1 加热方式 237
- 6.2 加热计算 237
- 6.3 金属在盐浴中的加热 241
- 6.4 金属在流态炉中的加热 248
- 6.5 金属在可控气氛中的加热 249
- 6.6 金属在真空中的加热 251
- 6.7 加热工艺和设备的节能途径 253
- 6.8 氧化与脱碳 254
- 6.9 淬火冷却过程 262
- 6.10 淬火冷却介质 266
- 6.11 畸变与开裂 288

第 7 章 钢的常规热处理 293

- 7.1 钢的退火和正火工艺规范及性能 293

7.2 钢的淬火和回火工艺规范及性能	313	12.4 碳氮共渗工艺及性能	636
7.3 钢的冷处理工艺及效果	337	12.5 渗硼工艺及性能	650
第 8 章 铸铁的热处理	341	12.6 渗硫与硫氮共渗工艺及性能	662
8.1 铸铁牌号命名法	341	12.7 氮碳共渗工艺及性能	668
8.2 灰铸铁成分、热处理工艺和性能	342	12.8 渗金属工艺及性能	682
8.3 可锻铸铁成分、热处理工艺和性能	355	第 13 章 气相沉积技术	695
8.4 球墨铸铁成分、热处理工艺和性能	364	13.1 典型涂层的特性	695
8.5 铸铁件热处理质量检验、缺陷分析与防止	378	13.2 化学气相沉积工艺及性能	696
第 9 章 非铁金属和合金的热处理	391	13.3 物理气相沉积工艺及性能	699
9.1 铜和铜合金的热处理及性能	391	第 14 章 可控气氛	704
9.2 铝和铝合金的热处理及性能	415	14.1 金属在加热过程中气体的反应	704
9.3 钛合金的热处理及性能	441	14.2 可控气氛的类型、制备方法和应用范围	712
9.4 镁合金的热处理及性能	448	14.3 炉气碳势控制	730
9.5 镍和镍合金的性能	458	第 15 章 粉末冶金件的热处理	740
9.6 锌合金的热处理和性能	460	15.1 铁基粉末冶金件的热处理工艺及性能	740
9.7 铸造轴承合金的性能	461	15.2 钢结硬质合金的热处理工艺及性能	751
9.8 铅合金的性能	463	15.3 硬质合金热处理工艺及性能	758
9.9 钨、钼、钽、铌及其合金的性能	464	第 16 章 工模具、量具的热处理	760
9.10 非铁金属和合金的热物理性质	466	16.1 工模具、量具钢的化学成分和物理化学性能	760
第 10 章 功能合金的热处理	470	16.2 工具的热处理	773
10.1 磁性合金的热处理	470	16.3 量具的热处理	803
10.2 膨胀合金的热处理	479	16.4 模具的热处理	808
10.3 弹性合金的热处理	484	16.5 国外工模具钢钢号近似对照及热处理	845
第 11 章 钢的表面热处理	495	第 17 章 弹簧的热处理	884
11.1 感应加热热处理工艺规范及性能	495	17.1 弹簧钢的化学成分和物理化学性能	884
11.2 火焰加热热处理工艺规范及性能	536	17.2 弹簧的热处理工艺和性能	889
11.3 激光电子束表面相变硬化工艺规范及性能	544	17.3 弹簧的特殊热处理	901
11.4 离子注入处理工艺规范及效果	553	第 18 章 滚动轴承的热处理	903
第 12 章 化学热处理	557	18.1 轴承钢的化学成分、物理化学性能	903
12.1 铁和化学元素的二元、三元相图	557	18.2 轴承热处理工艺和性能	908
12.2 渗碳工艺及性能	562		
12.3 渗氮工艺及性能	598		

第 19 章 大型零件热处理 939

19.1 大型铸锻件化学成分、热处理工艺和性能 939

19.2 电站设备大件用钢化学成分、热处理工艺和性能 986

19.3 大型冷轧辊用钢化学成分、热处理工艺和性能 1005

第 20 章 农机具及日用五金件热处理 1011

20.1 农机具的热处理 1011

20.2 日用五金件的热处理 1016

第 21 章 热处理的质量控制 1019

21.1 热处理技术标准和热处理工艺

守则 1019

21.2 热处理的质量控制体系 1020

21.3 热处理质量统计分析图表 1038

21.4 测温元件与仪表 1042

第 22 章 热处理的质量检验 1061

22.1 热处理质量检验标准 1061

22.2 硬度检验方法和换算 1061

22.3 金相组织检验 1079

22.4 金属和合金性能的测试 1086

22.5 无损探伤和内应力测试 1089

22.6 耐腐蚀性能 1115

附录 通用数据和换算 1116**参考文献** 1155

1.1.1 化学元素周期表(图 1-1 及表 1-1 和表 1-2)



图 1-1 金属元素的原子直径

表 1-1 化学元素周期表

非金属

金属

I ^a	II ^a	III ^b	IV ^b	V ^b	VI ^b	VII ^b	VIII	IB	II ^b	III ^a	IV ^a	V ^a	VI ^a	VII ^a	0	电子轨道		
1 1 H +1 1.0079	2 2 He 0 4.00260															K		
3 3 Li +1 6.939	4 4 Be +2 9.0122															K-L		
11 11 Na +1 22.9898	12 12 Mg +2 24.312	13 13 Al +3 26.98154	14 14 Si +4 28.086	15 15 P +3 30.97376	16 16 S +2 32.06	17 17 Cl +1 35.453	18 18 Ar 0 39.948									K-L-M		
19 19 K +1 39.09	20 20 Ca +2 40.08	21 21 Sc +3 44.9559	22 22 Ti +4 47.9	23 23 V +5 50.941	24 24 Cr +6 51.996	25 25 Mn +7 54.9380	26 26 Fe +8 55.847	27 27 Co +9 58.9332	28 28 Ni +10 58.71	29 29 Cu +11 63.54	30 30 Zn +12 65.38	31 31 Ga +3 69.72	32 32 Ge +4 72.59	33 33 As +3 74.9216	34 34 Se +4 78.96	35 35 Br +1 79.904	36 36 Kr 0 83.80	-L-M-N
37 37 Rb +1 85.467	38 38 Sr +2 87.62	39 39 Y +3 88.9059	40 40 Zr +4 91.22	41 41 Nb +5 92.9064	42 42 Mo +6 95.94	43 43 Tc +7 98.9062	44 44 Ru +8 101.07	45 45 Rh +9 102.905	46 46 Pd +10 106.4	47 47 Ag +11 107.868	48 48 Cd +12 112.40	49 49 In +3 114.82	50 50 Sn +4 118.69	51 51 Sb +5 121.75	52 52 Te +6 127.60	53 53 I +7 126.9045	54 54 Xe 0 131.30	-L-M-N
55 55 Cs +1 132.9054	56 56 Ba +2 137.3	57 57 La +3 138.9055	58 58 Ce +4 140.12	59 59 Pr +3 140.9077	60 60 Nd +2 144.24	61 61 Pm +3 147	62 62 Sm +2 150.4	63 63 Eu +3 151.96	64 64 Gd +3 157.25	65 65 Tb +3 158.925	66 66 Dy +3 162.50	67 67 Ho +3 164.9304	68 68 Er +3 167.26	69 69 Tm +3 168.9342	70 70 Yb +3 173.04	71 71 Lu +3 174.967	-M-N-O	
87 87 Fr +1 223.0254	88 88 Ra +2 226.0254	89 89 Ac +3 227	90 90 Th +4 232.038	91 91 Pa +5 231.0359	92 92 U +6 238.029	93 93 Np +7 237.0482	94 94 Pu +8 239.052	95 95 Am +9 243	96 96 Cm +10 247	97 97 Bk +11 247	98 98 Cf +12 251	99 99 Es +13 254	100 100 Fm +14 257	101 101 Md +15 258	102 102 No +16 259	103 103 Lr +17 260	-N-O-P	

原子序数 → 50
元素符号 → Sn
原子量 → 118.69
氧化价 → +2
电子分布 → -18-18-4

注：
1. 括号内的数是天然放射性元素较重要的同位素的质量数或人造元素半衰期最长的同位素的质量数。
2. 原子量根据 1999 年国际原子量表，以 $^{12}\text{C}=12$ 为基础。
3. 元素中文名称参见元素物理化学性质表，105~109 号元素分别读作 dǔ(铪土)、xī(镱)、bō(铍)、hē(镱)、mài(镆)。

过渡族元素

镧系	58 58 Ce +4 140.12	59 59 Pr +3 140.9077	60 60 Nd +2 144.24	61 61 Pm +3 147	62 62 Sm +2 150.4	63 63 Eu +3 151.96	64 64 Gd +3 157.25	65 65 Tb +3 158.925	66 66 Dy +3 162.50	67 67 Ho +3 164.9304	68 68 Er +3 167.26	69 69 Tm +3 168.9342	70 70 Yb +3 173.04	71 71 Lu +3 174.967	-N-O-P
锕系	90 90 Th +4 232.038	91 91 Pa +5 231.0359	92 92 U +6 238.029	93 93 Np +7 237.0482	94 94 Pu +8 239.052	95 95 Am +9 243	96 96 Cm +10 247	97 97 Bk +11 247	98 98 Cf +12 251	99 99 Es +13 254	100 100 Fm +14 257	101 101 Md +15 258	102 102 No +16 259	103 103 Lr +17 260	-O-P-Q

原子序数 → 50
元素符号 → Sn
原子量 → 118.89
氧化价 → +2
电子分布 → -18-18-4

注：
1. 括号内的数是天然放射性元素较重要的同位素的质量数或人造元素半衰期最长的同位素的质量数。
2. 原子量根据 1999 年国际原子量表，以 $^{12}\text{C}=12$ 为基础。
3. 元素中文名称参见元素物理化学性质表，105~109 号元素分别读作 du(铪土)、xi(镎)、bo(镅)、he(氦)、mai(钼)。

过渡族元素

表 1-2 金属晶体原子位置、原型、结构符号、空间群标记和点阵参数

0	I	II	III	IV	V	VI	VII
He-2 FCC (其他)	Li-3 BCC* HCP1	Be-4 HCP* BCC	B-5 HCP* BCC	C-6 HCP* BCC	N-7 HCP* BCC	O-8 HCP* BCC	F-9
Ne-10 FCC	Na-11 BCC* HCP	Mg-12 HCP* BCC	Al-13 HCP* FCC	Si-14 HCP* BCC	P-15 HCP* BCC	S-16 HCP* BCC	Cl-17 HCP* BCC
0	Ia	IIa	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa
Ar-18 FCC	K-19 BCC	Ca-20 FCC* BCC	Sc-21 HCP* BCC	Ti-22 HCP* BCC	V-23 BCC	Cr-24 BCC	Mn-25 HCP* FCC
Kr-36 FCC	Rb-37 BCC	Sr-38 FCC* HCP	Y-39 HCP* BCC	Zr-40 HCP* BCC	Nb-41 BCC	Mo-42 BCC	Tc-43 HCP
Xe-54 FCC	Cs-55 BCC	Ba-56 BCC	La-57 HCP* FCC	Hf-72 HCP* BCC	Ta-73 BCC	W-74 BCC	Re-75 HCP
Rn-86	Fr-87	Ra-88	Ac-89 FCC				
合金 化合价	1	2	3	4	5	6	6

0	Ia	IIa	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	VIII	Ib	IIb	IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb
Ar-18 FCC	K-19 BCC	Ca-20 FCC* BCC	Sc-21 HCP* BCC	Ti-22 HCP* BCC	V-23 BCC	Cr-24 BCC	Mn-25 HCP* FCC	Co-27 HCP* FCC	Cu-29 FCC	Zn-30 HCP	Ga-31 HCP	Ge-32 HCP	As-33 HCP	Se-34 HCP	Br-35 HCP
Kr-36 FCC	Rb-37 BCC	Sr-38 FCC* HCP	Y-39 HCP* BCC	Zr-40 HCP* BCC	Nb-41 BCC	Mo-42 BCC	Tc-43 HCP	Rh-45 FCC	Ag-47 FCC	Cd-48 HCP	In-49 HCP	Sn-50 HCP	Sb-51 HCP	Te-52 HCP	I-53 HCP
Xe-54 FCC	Cs-55 BCC	Ba-56 BCC	La-57 HCP* FCC	Hf-72 HCP* BCC	Ta-73 BCC	W-74 BCC	Re-75 HCP	Ir-77 FCC	Au-79 FCC	Hg-80 FCC	Tl-81 HCP	Pb-82 FCC	Bi-83 FCC	Po-84 FCC	At-85 FCC
Rn-86	Fr-87	Ra-88	Ac-89 FCC												
合金 化合价	1	2	3	4	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

注1: 镧系 ~71) 和铀系 (90~103) 稀土元素省略。
 注2: C化合价是4, N和P是3。
 注3: (2)和(1)不是合金化合价。

H-1
(-58)
XX

在括号内的原子尺寸因子是75°F时小于 -) 或大于 (+) γ-Fe (FCC) 的%。
 考虑点阵配位数 (CN), 除了间隙原子 H, B, C, N 和 O 为 6 外, 其余 CN 为 12。
 VI, VIIb, VIII 和 VIIb 族与金属形成离子化合物。

与铁合金形成的 γ-Fe (FCC) 相区的类型

- 形成 γ 相区, 例如 Cr
- 形成有限 γ 相区, 例如 B
- 扩大 γ 区, 例如 Ni
- 缩小 γ 区, 例如 C

结构

BCC—体心立方
 FCC—面心立方
 HCP—密排六方

XX—非体心、非面心或密排六方,
 通常是更复杂的结构

*—在 23.89°C (75°F) 时的结构
 †—也是 FCC ‡—也是 BCC

置换式固溶体

- 有利的尺寸因子: 0~±13%
- 边界的尺寸因子: ±14%~±16%
- ⊗ 不利的尺寸因子: >±16%

间隙式固溶体

- ▲ 有利的尺寸因子: >-40%
- △ 边界的尺寸因子: -30%~-40%
- △ 不利的尺寸因子: <-30%

1.2 化学元素的物理化学性质(表1-3)

表 1-3 化学元素的物理化学性质

元素 符号	元素 名称	原子 序数	密度 (20℃) /t·m ⁻³	熔点 /℃	沸点 /℃	比热容 (20℃) /×4.1868 kJ· (kg·K) ⁻¹	溶解热 /×4.1868 kJ·kg ⁻¹	热导率 /×418.68W ·(m·K) ⁻¹	线胀系数 (0~100℃) /×10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹	电阻系数 (0℃) /×10 ⁻⁸ Ω·m	电阻温度 系数 (0℃) /×10 ⁻³ ·℃ ⁻¹	磁化率 (18℃) 10 ⁻⁶	弹性模量 /MPa
Ac	锕	89	10.07	1050	3200	—	—	—	—	—	4.23	—	—
Ag	银	47	10.49	960.8	2210	0.0559	25	1.0	19.7	1.5	4.29	-0.1813	70000~82000
Al	铝	13	2.6984	660.1	2500	0.215	94.6	0.53	23.6	2.655	4.23	+0.62	69000~72000
Am	镅	95	11.7	≈1200	≈500	—	—	—	50.8	145	—	—	—
Ar	氩	18	1.784×10 ⁻³	-189.2	-185.7	0.125	6.7	0.406×10 ⁻⁴	—	—	—	-0.45	—
As	砷	33	5.73	814(36atm)	613(升华)	0.082	88.5	—	4.7	35.0	3.9	-0.31	7900
Au	金	79	19.32	1063	2966	0.0312	16.1	0.71	14.2	2.065	3.5	-0.142	79000~80000
B	硼	5	2.34	2300	3675	0.309	—	—	8.3(40℃)	1.8×10 ¹²	—	-0.63	—
Ba	钡	56	3.5	710	1640	0.068	—	—	19.0	50	—	+0.9	12900
Be	铍	4	1.84	1283	2970	0.45	260	0.35	11.6	6.6	6.7	-1.00	315000~289800
Bi	铋	83	9.80	271.2	1420	0.0294	12.5	0.020	13.4	106.8	4.2	-1.35	32340
Br	溴	35	3.12(液态)	-7.1	58.4	0.070	16.2	—	—	6.7×10 ⁷	—	-0.39	—
C	碳	6	2.25(石墨)	3727	4830	0.165	—	0.057	0.6~4.3	1375	0.6~1.2	-0.49	4900
Ca	钙	20	1.55	850	1440	0.155	52	0.3	22.3	3.6	3.33	+1.1	20000~26000
Cd	镉	48	8.65	321.03	765	0.055	13.2	0.22	31.0	7.51	4.24	-0.182	53500
Ce	铈	58	6.90	804	3468	0.042	8.5	0.026	8.0	75.3(25℃)	0.87	+17.5	30600
Cl	氯	17	3.214×10 ⁻³	-101	-33.9	0.116	21.6	0.172×10 ⁻⁴	—	10×10 ⁹	—	-0.57	—
Co	钴	27	8.9	1492	2870	0.099	58.4	0.165	12.4	5.06(α)	6.6	铁磁性(α)	214000
Cr	铬	24	7.19	1903	2642	0.11	96	0.16	6.2	12.9	2.5	+2.65	259000
Cs	铯	55	1.90	28.6	685	0.052	3.8	—	97	19.0	4.96	+0.1	—
Cu	铜	29	8.96	1083	2580	0.092	50.6	0.94	17.0	1.67~1.68 (20℃)	4.3	-0.086	117000~126500
Dy	镝	66	8.56	1407	2300	0.041	25.2	0.024	7.7	56.0	1.19	铁磁性	64350
Er	铒	68	9.16	1500	≈2600	0.04	24.5	0.023	10.0	107	2.01	低温时为铁磁性	74750
Eu	铕	63	5.30	≈830	≈1430	0.039	16.5	—	—	81.3	4.30	—	—
F	氟	9	1.696×10 ⁻³	-219.6	-188.2	0.18	10.1	—	—	—	—	—	—

(续)

元素 符号	元素 名称	原子 序数	密度 (20℃) /t·m ⁻³	熔点 /℃	沸点 /℃	比热容 (20℃) /×4.1868 kJ· (kg·K) ⁻¹	熔解热 /×4.1868 kJ·kg ⁻¹	热导率 /×418.68W (m·K) ⁻¹	线胀系数 (0~100℃) /×10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹	电阻系数 (0℃) /×10 ⁻⁸ Ω·m	电阻温度 系数 (0℃) /×10 ⁻³ ·℃ ⁻¹	磁化率 (18℃) 10 ⁻⁶	弹性模量 /MPa
Fe	铁	26	7.87	1537	2930	0.11	65.5	0.18	11.76	9.7(20℃)	6.0	铁磁性	200000~215500
Ga	镓	31	5.91	29.8	2260	0.079	19.16	0.07	18.3	13.7	3.9	-0.225	—
Gd	钆	64	7.87	1312	≈2700	0.0574	23.5	0.021	0.0~10.0	134.5	1.76	铁磁性	67300
Ge	锗	32	5.323	958	2880	0.073	7.3	0.14	5.92	0.86×10 ⁶ ~52×10 ⁶	1.4	-0.12	—
H	氢	1	0.0899×10 ⁻³	-259.04	-252.61	3.45	15.0	4.06×10 ⁻⁴	—	—	—	-1.97	—
He	氦	2	0.1785×10 ⁻³	-269.5	-268.9	1.25	0.825	3.32×10 ⁻⁴	—	—	10 ²¹ (20℃)	-0.47	—
Hf	铪	72	13.28	2225	5400	0.0351	—	0.223	5.9	32.7~43.9	4.43	—	98000~140600
Hg	汞	80	13.546 (液态)	-38.87	356.58	0.033	2.8	0.0196	182	94.07	0.99	-0.17	—
Ho	钬	67	8.8	1461	≈2300	0.039	24.9	—	—	87.0	1.71	—	68400
I	碘	53	4.93	113.8	183	0.052	14.2	10.4×10 ⁻⁴	93	1.3×10 ¹⁵	—	-0.36	—
In	铟	49	7.31	156.61	2050	0.057	6.8	0.057	33.0	8.2	4.9	-0.11	10700~11250
Ir	铱	77	22.4	2443	5300	0.0323	—	0.14	6.5	4.85	4.1	+0.133	525000~53220
K	钾	19	0.87	63.2	765	0.177	14.5	0.24	83	6.55	5.4	+0.455 (30℃)	—
Kr	氪	36	3.743×10 ⁻⁸	-157.1	-153.25	—	—	0.21×10 ⁻⁴	—	—	-0.39	—	—
La	镧	57	6.18	920	3470	0.048	17.3	0.033	5.1	56.8(20℃)	2.18	+1.04	38200~39200
Li	锂	3	0.531	180	1347	0.79	104.2	0.17	56	8.55	4.6	+0.50	5000
Lu	镥	71	9.74	1730	1930	0.037	26.29	—	—	79.0	2.40	—	—
Mg	镁	12	1.74	650	1108	0.245	88±2	0.367	24.3	4.47	4.1	+0.49	45700
Mn	锰	25	7.43	1244	2150	0.115	63.7	0.0119 (-192℃)	37	185(20℃)	1.7	+9.9	201600
Mo	钼	42	10.22	2625	4800	0.66	~69.8	0.34	4.9	5.17	4.71	+0.04	322000~350000
N	氮	7	1.25×10 ⁻³	-210	-195.8	0.247	6.2	6×10 ⁻⁵	—	—	—	+0.8	—
Na	钠	11	0.9712	97.8	892	0.295	27.5	0.32	71	4.27	5.47	+0.51~+0.66	—
Nb	铌	41	8.57	2468	5130	0.065	69	0.125~0.13	7.1	13.1~15.22	3.95	+1.5~+2.28	87200
Nd	钕	60	7.00	1024	3180	0.045	11.78	0.031	7.4	64.3(25℃)	1.64	+36	38650

(续)

元素 符号	元素 名称	原子 序数	密度 (20℃) /t·m ⁻³	熔点 /℃	沸点 /℃	比热容 (20℃) /×4.1868 kJ· (kg·K) ⁻¹	溶解热 /×4.1868 kJ·kg ⁻¹	热导率 /×418.68W (m·K) ⁻¹	线胀系数 (0~100℃) /×10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹	电阻系数 (0℃) /×10 ⁻⁸ Ω·m	电阻温度 系数 (0℃) /×10 ⁻³ ·℃ ⁻¹	磁化率 (18℃) 10 ⁻⁶	弹性模量 /MPa
Ne	氖	10	0.8999×10 ⁻³	-248.6	-246.0	—	—	0.00011	—	—	—	+0.33	—
Ni	镍	28	8.90	1453	2732	0.105	73.8	0.22	13.4	6.84	5.0~6.0	铁磁性	197000~220000
Np	镎	93	20.25	637	—	—	—	—	50.8	145(20℃)	—	+2.6	—
O	氧	8	1.429×10 ⁻³	-218.83	-182.97	0.218	3.3	59×10 ⁻⁶	—	—	—	+106.2	—
Os	锇	76	22.5	≈3045	5500	0.031	—	—	5.7~6.57	9.66	4.2	+0.052	60000
P	磷 (白)	15	1.83	44.1	280	0.177	5.0	—	125	1×10 ¹⁷	-0.456	-0.90	—
Pa	镤	91	15.4	≈1230	≈4000	—	—	—	—	—	—	+2.6	—
Pb	铅	82	11.34	327.3	1750	0.0306	6.26	0.083	29.3	18.8	4.2	-0.12	16000~18280
Pd	钯	46	12.16	1552	≈3980	0.0584	3.42	0.168	11.8	9.1	3.79	+5.4	112800~123600
Pm	钷	61	—	≈1000	≈2700	—	—	—	—	—	—	—	—
Po	钋	84	9.4	254	960	—	—	—	24.4	42±10(α) 44±10(β)	4.6(α) 7.0(β)	—	—
Pr	镨	59	6.77	935	3020	0.045	11.71	0.028	5.4	68(25℃)	1.71	+25	35900
Pt	铂	78	21.45	1769	4530	0.0324	26.9	0.165	8.9	9.2~9.6	3.99	+1.1	154700~170000
Pu	钚	94	19.0~19.8	639.5	3235	0.032	—	0.020	50.8	145(28℃)	-0.21	+2.2~+2.52	101250
Ra	镭	88	5.0	700	1500	—	—	—	—	—	—	—	—
Rb	铷	37	1.53	38.8	680	0.080	6.5	—	90.0	11	4.81	+0.196(30℃)	—
Re	铼	75	21.03	3180	5900	0.033	—	0.17	6.7	19.5	1.73	+0.046	471000~476000
Rh	铑	45	12.44	1960	4500	0.059(0℃)	—	0.21	8.3	6.02	4.35	+1.1	280000
Rn	氡	86	9.960×10 ⁻³	71	-61.8	—	—	—	—	—	—	—	—
Ru	钌	44	12.2	2400	4900	0.057 (20℃)	—	—	9.1	7.157	4.49	+0.427	420000
S	硫	16	2.07	115	444.6	0.175	9.3	6.31×10 ⁻⁴	64	2×10 ²³ (20℃)	—	-0.48	—
Sb	锑	51	6.68	630.5	1440	0.049	38.3	0.045	8.5~10.8	39.0	5.1	-0.736	79000
Se	硒	21	2.992	1539	2730	0.134	84.52	—	—	61(22℃)	—	+0.18	—
Se	硒	34	4.808	220	685	0.077	16.4	7~18.3 ×10 ⁻⁴	37	12	4.45	-0.32	55000

元素 符号	元素 名称	原子 序数	密度 (20℃) $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$	熔点 /℃	沸点 /℃	比热容 (20℃) $\text{J} \times 4.1868$ $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	溶解热 $\text{J} \times 4.1868$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	热导率 $\text{J} \times 418.68 \text{W}$ $\cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	线胀系数 (0~100℃) $\text{J} \times 10^{-6}$ $\cdot \text{K}^{-1}$	电阻系数 (0℃) $\text{J} \times 10^{-8}$ $\Omega \cdot \text{m}$	电阻温度 系数 (0℃) $\text{J} \times 10^{-3}$ $\cdot \text{K}^{-1}$	磁化率 (18℃) 10^{-6}	弹性模量 /MPa
Si	硅	14	2.329	1412	3310	0.162(0℃)	432	0.20	2.8~7.2	10	0.8~1.8	-0.12	115000
Sm	钐	62	7.53	1052	1630	0.042	17.29	—	—	88.0	1.48	—	34750
Sn	锡	50	7.298	231.91	2690	0.054	14.5	0.150	23	11.5	4.4	-0.40	41500~47800
Sr	锶	38	2.60	770	1460	0.176	25	—	—	30.7	3.83	-0.2	—
Ta	钽	73	16.67	2980	5400	0.034	38	0.130	6.55	13.1	3.85	+0.93	188200~192000
Tb	铽	65	8.267	1356	2530	0.044	24.54	—	—	—	—	—	58650
Tc	锝	43	11.46	≈2100	4600	—	—	—	—	—	—	—	—
Te	碲	52	6.24	450	990	0.047	32	0.014	17.0	1×10 ⁵ ~ 2×10 ⁵	—	-0.301	43500
Th	钍	90	11.724	1695	4200	0.034	<19.82	0.090	11.3~11.6	19.1	2.26	+0.57	74200
Ti	钛	22	4.508	1677	3530	0.124	104	0.036(α)	8.2	42.1~47.8	3.97	+3.2	78700
Tl	铊	81	11.85	≈304	1470	0.031	5.04	0.093	28.0	15~18.1	5.2	-0.215	8100
Tm	铥	69	9.325	1545	1700	0.038	26.04	—	—	79.0	1.95	—	—
U	铀	92	19.05	1132	3930	0.0275	—	0.071	6.8~14.1	29.0	2.18~2.76	+2.6	161000~168000
V	钒	23	6.1	1910	3400	0.127	—	0.074	8.3	24.8~26	2.8	+4.5	129500~147000
W	钨	74	19.3	80	5900	0.034	44	0.397	4.6(20℃)	5.1	4.82	+0.284	350000~415300
Xe	氙	54	5.495×10 ⁻³	-112	-108	—	—	1.24×10 ⁻⁴	—	—	—	—	—
Y	钇	39	4.475	1509	≈3200	0.071	46	0.035	—	—	—	+5.3	67600
Yb	镱	70	6.966	824	1530	0.035	12.71	—	25	30.3	1.30	—	18150
Zn	锌	30	7.134 (25℃)	419.505	907	0.0925	24.09	0.27	39.5	5.75	4.2	-0.157	94000~130000
Zr	锆	40	6.507	1852±2°	3580	0.068	~60	0.211 (25℃)	5.85	39.7~40.5	4.35	-0.45	79800~97700

注: 1atm = 101325Pa。

1J = 1N·m(牛·米) = 1W·s(瓦·秒) = 239 × 10⁻⁶ kcal。

1.3 常见无机化合物的物理化学性质(表 1-4)

表 1-4 常见无机化合物物理化学性质

名称	化学式	相对 分子质量	颜色	物态	晶系	密度 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	熔点 $^{\circ}\text{C}$	沸点 $^{\circ}\text{C}$	摩尔热容	摩尔嫡	摩尔生成焓	吉布斯能
									$\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$	$\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	
碳化硼	B_4C	55.29	黑	—	—	2.54	2450	> 3500	52.80	27.10	—	—
氧化硼	B_2O_3	60.64	无	玻璃状	—	1.85	577	> 1500	62.76	80.80	-1254	—
碳酸钡	BaCO_3	197.37	白	—	正交或六角	4.29	1740 (90atm)	—	—	—	—	—
氧化钡	BaO	153.36	无	—	立方或六方	5.72	1923	200	47.45	70.30	-558.1	-528.4
硝酸钡	$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	261.38	无	—	立方	3.244	592	解	151.0	214.0	-991.9	-795.0
硫酸钡	BaSO_4	233.42	无	—	正交斜方	4.499	解 1580	—	101.8	132.0	-1465.0	-1353.0
碳(金刚石)	C	12.01	无	—	立方	3.51	> 3500	4200	6.117	2.37	1.828	2.833
碳(石墨)	C	12.01	黑	—	六角	2.26	> 3500	4200	8.54	5.74	0	0
四氯化碳	CCl_4	153.84	无	液体	—	1.595	-22.6	76.8	—	—	—	—
一氧化碳	CO	28.01	无	气体	—	0.968	-207	-192	29.1	197.54	-110.52	-137.14
二氧化碳	CO_2	44.01	无	气体	—	(空)	-56.6 (5atm)	升 -78.5	37.11	213.68	-393.51	-394.38
二硫化碳	CS_2	76.13	无	液体	—	1.261	-108.6	46.3	75.73	151.0	88.7	64.4
氯化钙	CaCl_2	110.99	白	—	六方	2.152	772	> 1600	72.63	113.80	-795.0	-750.2
硫酸钙 (无水)	CaSO_4	136.14	无	—	正交或单斜	29.6	1450 (单斜)	—	99.60	106.70	-1432.7	-1320.3
氯化铬	CrCl_3	158.38	紫	—	六角	2.757	—	1200, 1500	91.80 (单斜)	124.7 (单斜)	-570.3 (单斜)	-500.7 (单斜)
氮化铬	CrN	66.02	—	—	立方	5.8	解 1500	—	56.50	52.70	-123.4	-103.5
二碳化三铬	Cr_3C_2	180.05	灰	—	斜方	6.68	1890	3800	98.44	85.41	-79.5	-81.2
铬酐 (三氧化铬)	CrO_3	100.01	红	—	六角	2.7	解 197	—	—	73.2	-590.4	—
氧化铬	Cr_2O_3	152.02	深绿	—	—	5.21	1900	—	118.8	81.2	-1140.6	-1059.0
碳化铁	Fe_3C	179.56	—	—	—	7.4	1837	—	106.0	108.0	—	—
氯化铁	FeCl_3	162.22	暗棕	—	立方	2.804	282	315	94.93	—	-399.4	—

(续)

名称	化学式	相对 分子质量	颜色	物态	晶系	密度 $/\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$	熔点 $/^{\circ}\text{C}$	沸点 $/^{\circ}\text{C}$	摩尔热容 $/\text{J}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$		摩尔熵 $/\text{J}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$	摩尔生成焓 $/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	吉布斯能
氧化亚铁	FeO	71.85	黑	—	—	5.7	1420	—	49.42	60.75	—	-264.8	-244.3
四氧化三铁	Fe_3O_4	231.55	黑	—	立方	5.2	1538	—	150.80	146.2	—	-1117.1	-1014.2
氧化铁	Fe_2O_3	159.70	红或黑	—	三斜	5.12	1560	—	49.92	60.75	—	-264.8	-244.3
硫化亚铁	FeS	87.91	黑	—	六方	4.84	1193	—	50.54	60.29	—	-100.4	-100.8
二硫化铁	FeS_2	119.98	黄	—	立方	5.0	1170	—	62.17	52.93	—	-163.2	-151.8
氰化氢	HCN	27.03	无	气体	—	0.697	-14	26	70.63	113.10	—	135 (气体)	125.5
氯化氢	HCl	36.47	无	气或液	—	1.268 (空)	-111	-85	29.13	186.80	—	-91.80	-94.79
水	H_2O	18.016	无	液体	六角	1.00	0	100	75.30	70.08	—	-285.83	-237.24
氰化钾	KCN	65.11	白	—	立方	1.52	634.5	—	65.06	137.03	—	-112.50	-103.90
硫氰化钾	KCNS	97.17	无	—	单斜	1.886	172.3	解 500	—	—	—	-203.4	—
碳酸钾	K_2CO_3	138.20	白	—	—	2.29	891	解	115.70	156.32	—	-1146.1	-1059.8
氯化钾	KCl	74.56	无	—	立方	1.988	790	1500	51.29	82.56	—	-435.9	-408.0
氯酸钾	KClO_3	122.56	无	—	单斜	2.32	368	解 400	100.25	142.97	—	-391.2	-289.9
重铬酸钾	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	294.21	橙	—	单斜	2.69	398	解	219.70	291.20	—	-2033.0	-1866.0
氟化钾	KF	58.10	无	—	立方	2.48	880	1500	49.32	104.60	—	-928.45	-860.45
亚硝酸钾	KNO_2	85.10	无	—	—	1.915	387	解 350	—	117.0	—	-370.30	-281.6
硝酸钾	KNO_3	101.10	无	—	正交、六角	2.11	333	解 400	115.70	156.32	—	-1146.10	-1059.8
氢氧化钾	KOH	56.10	白	—	正交	2.044	380	1320	65.87	79.32	—	-425.8	-380.2
硫化钾	K_2S	110.25	无	—	立方	1.805	471	—	—	111.30	—	-428.4	-404.2
硫酸钾	K_2SO_4	174.25	无	—	正交	2.662	1067	—	130.1 (β)	175.7 (β)	—	-1433.7 (β)	-1316.4 (β)
十水四硼酸钠 (硼砂)	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 10\text{H}_2\text{O}$	381.43	白	—	单斜	1.73	75	—	186.8 (无水物)	189.5 (无水物)	—	3276.7 (无水物)	-3081.6 (无水物)
氰化钠	NaCN	49.02	无	—	立方	—	563.7	1496	—	—	—	-89.8	—
碳酸钠 (纯碱或苏打)	Na_2CO_3	106.00	白	—	—	2.533	851	解	109.2	136.4	—	-1131	-1047.5
一水合碳酸钠 (苏打)	$\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot \text{H}_2\text{O}$	286.16	白	—	单斜	1.46	解	—	—	—	—	-4083.5	-3424.3

(续)

名称	化学式	相对 分子质量	颜色	物态	晶系	密度 $\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$	熔点 $^{\circ}\text{C}$	沸点 $^{\circ}\text{C}$	摩尔热容 $[\text{J}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}]$		摩尔生成焓 $[\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}]$	吉布斯能
氯化钠	NaCl	58.45	无	—	立方	2.163	800.4	1413	49.71	72.12	-411.1	-384.0
碳酸氢钠 (小苏打)	NaHCO_3	84.01	白	—	单斜	2.20	解 270	—	87.61	102.0	-947.7	-851.9
亚硝酸钠	NaNO_2	69.01	浅灰	—	正交	2.168 (氧)	271	解 320	—	106.0	-359.0	-295.0
硝酸钠	NaNO_3	85.01	无	—	三斜	2.257	308	解 380	93.05	116.0	-466.7	-365.9
氢氧化钠 (烧碱或火碱)	NaOH	40.00	白	—	—	2.130	318.4	1390	59.66	64.4	-425.6	-380.7
磷酸钠	Na_3PO_4	163.97	白	—	—	2.537	1340	—	—	224.7	—	—
氧化钠	Na_2O	61.99	白	—	—	2.27	升	—	72.95	75.27	-416	-377.1
过氧化钠	Na_2O_2	77.99	浅黄	—	—	2.805	解	—	89.37	94.88	-510.4	-446.9
硫氰化铵	NH_4CNS	76.12	无	—	单斜	1.305	149.6	解 170	—	—	-82.0	—
氯化铵	NH_4Cl	53.50	白	—	立方	1.53	解 350	升 520	84.10	95.80	-314.2	-203.2
亚硝酸铵	NH_4NO_2	64.05	白(浅黄)	—	—	1.69	解	—	—	—	-256.0	—
硝酸铵	NH_4NO_3	80.05	无	—	正交或单斜	1.725	169.6	解 210	139.0	151.0	-365.4	-183.8
硫酸铵	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	132.14	无	—	正交	1.769	解 513	—	187.0	220.0	-1180.0	-901.3
过二硫酸铵	$(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$	228.20	白	—	单斜	1.98	解 120	—	—	—	-1648.0	—
重铬酸铵	$(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	252.10	橙	—	单斜	2.15	解 185	—	—	—	-1977.0	—
二氯化二硫	S_2Cl_2	135.03	黄红	液体	—	1.687	-80	138	124.3	321.0	-58.20	-26.9(气体)
二氧化硫	SO_2	64.06	无	气体	—	液 1.434 (氧)	-75.5	-10.0	—	—	—	—
硫化氢	H_2S	34.08	无	气体	—	2.264 (空)	-82.9	-59.6	39.9	248.1	-296.9	-300.2
硫酸	H_2SO_4	98.08	无	液体	—	1.1895 (空)	10.49	—	34.2	205.7	-21.0	-33.8
碳化硅 (金刚砂)	SiC	40.07	深蓝	—	立方或六方	3.17	> 2700	—	138.9	156.9	-814.2	-690.3
四氯化硅	SiCl_4	169.89	无	液体	—	1.834	-70	57.6	26.86(立方)	16.61(立方)	-66.1(立方)	-63.7(立方)
四氯化钛	TiCl_4	189.73	无	液体	—	1.50	-30	136.4	26.69(六方)	16.48(六方)	-62.8(六方)	-60.35(六方)
						1.726	-30	136.4	145.3	239.7	-657.5	-617.6
									145.2	252.4	-804.2	-737.4

注:表中的“升”表示升华,“解”表示分解之意。

1.4 常见有机化合物的物理化学性质 (表 1-5)

表 1-5 常见有机化合物物理化学性质

名 称	化 学 式	相对分 子质量	密 度 /t·m ⁻³	熔 点 /℃	沸 点 /℃	物 态	燃 烧 热	熔 化	蒸 发 比 能	闪 点 /℃	自燃点 (在空气 中) /℃
							/ × 4186.68J ·(mol) ⁻¹	比 能	/ × 4186.8J· (kg·K) ⁻¹		
甲醇 (木精)	CH ₃ OH	32.04	0.7915	-97.8	64.65	液	—	—	—	8	464
甲苯	C ₆ H ₅ CH ₃	92.13	0.866	-95	110.8	液	934.2	—	86.5		536
甲烷	CH ₄	16.04	0.554	-182.6	-161.4	气	210.8	14.0	138		537
			(空)								
甲酚 (邻)	CH ₃ C ₆ H ₄ OH	108.13	1.048	30.8	190.8	固	879.5	—	—		
甲酚 (间)	CH ₃ C ₆ H ₄ OH	108.13	1.034	10.9	202.8	液	880.5	—	—		
甲酚 (对)	CH ₃ C ₆ H ₄ OH	108.13	1.035	35.6	202	固	880.0	26.3	—		
甲酰胺	HCONH ₂	48.05	1.1399	2.55	210	液	—	—	—		
乙二胺	H ₂ NCH ₂ CH ₂ NH ₂	60.10	0.9	8.5	117.2	液	452.6	—	—	33.9	
乙二醛	CHO·CHO	58.04	1.14	15	51	液	—	—	—		
					(776mm)						
乙烯	C ₂ H ₄	28.05	0.975	-169	-103.9	气	331.6	25.0	—		546
			(空)								
乙烷	C ₂ H ₆	30.07	1.049	-172	-88.6	气	368.4	22.2	258		472
			(空)								
乙酸	CH ₃ COOH	60.05	1.049	16.7	118.1	液	209.4	43.2	96.8	38.0	454
(醋酸)											
乙酸乙酯	CH ₃ COOC ₂ H ₅	88.10	0.901	-82.4	77.1	液	536.9	—	102.0		400
乙醇	C ₂ H ₅ OH	46.07	0.789	-112	78.4	液	327.6	24.9	204		404
乙醛	CH ₃ CHO	44.05	0.783	-123.5	20.2	液	279.0	—	136		156
二乙胺	(C ₂ H ₅) ₂ NH	73.14	0.712	-38.9	55.5	液	716.9	—	91.0	-26.0	490
二苯甲酮	C ₆ H ₅ COC ₆ H ₅	182.21	1.083	48.5	305.4	固	1556.5	23.5	—		
三乙醇胺	N(C ₂ H ₄ OH) ₃	149.19	1.1242	20.21	360	液	—	—	—	179.44	
丙烷	C ₃ H ₈	44.09	1.562	-187.1	-42.2	气	526.3	—	98		405
			(空)								
丙酮	CH ₃ COCH ₃	58.08	0.792	-94.6	56.5	液	426.8	28.4	124.5	-18	465
丙酸	C ₂ H ₅ COOH	74.08	0.992	-22	141.1	液	367.2	—	98.8	23	370
丙醇	C ₂ H ₅ CH ₂ OH	60.09	0.804	-127	97.8	液	480.5	—	97.2		
丁醇	C ₄ H ₉ OH	74.12	0.810	-79.9	117	液	638.6	29.9	141	34	410
丁酸	CH ₃ CH ₂ CH ₂ COOH	88.10	0.964	-4.7	-163.6	液	—	—	—		
苯	C ₆ H ₆	78.1	0.879	5.4	80.1	液	782.3	30.1	94.3	-11	540
苯甲酸	C ₆ H ₅ COOH	122.12	1.266	121.7	249.2	固	771.2	33.9	—		
苯甲醛	C ₆ H ₅ CHO	106.12	1.046	-26	179	液	841.3	—	86.5	64	205
苯胺	C ₆ H ₅ NH ₂	93.12	1.022	-6.2	184.4	液	811.7	21	103.7		562
苯酚	C ₆ H ₅ OH	94.11	1.071	42	181.4	固	732.2	29.0	—	75	
(石碳酸)											
戊烷	C ₅ H ₁₂	72.15	0.630	-129.7	36.3	液	833.4	27.7	—	< -40	285
己烷	C ₆ H ₁₄	86.17	0.659	-94	69	液	1149.9	33.7	76.3		
庚烷	CH ₃ (CH ₂) ₅ CH ₃	100.20	0.684	-90.6	98.4	液	110.0	—	—		
辛烷	C ₈ H ₁₈	114.22	0.703	-56.5	125.7	液	1302.7	43.2	70.9	13	240
尿素	(NH ₂) ₂ CO	60.06	1.335	132.7	解	固	128.6	—	—		
异硫氰化丙烯	C ₃ H ₅ N=CS	99.15	1.013	-80	152	液	—	—	—		
硫代氰酸	HCNS	59.09	—	5	—	液	—	—	—		

注：燃烧热数值是化合物在 20℃ 和 101.325kPa (一个大气压下) 燃烧，而其燃烧产物为液体水，气态二氧化碳和气态氮时的燃烧数值。物态是指该化合物在室温 (20℃) 条件下的存在形态。

第 2 章 钢铁热处理基础

2.1 Fe-C、Fe-Fe₃C 合金相图 (图 2-1 ~ 图 2-7 和表 2-1 ~ 表 2-5)

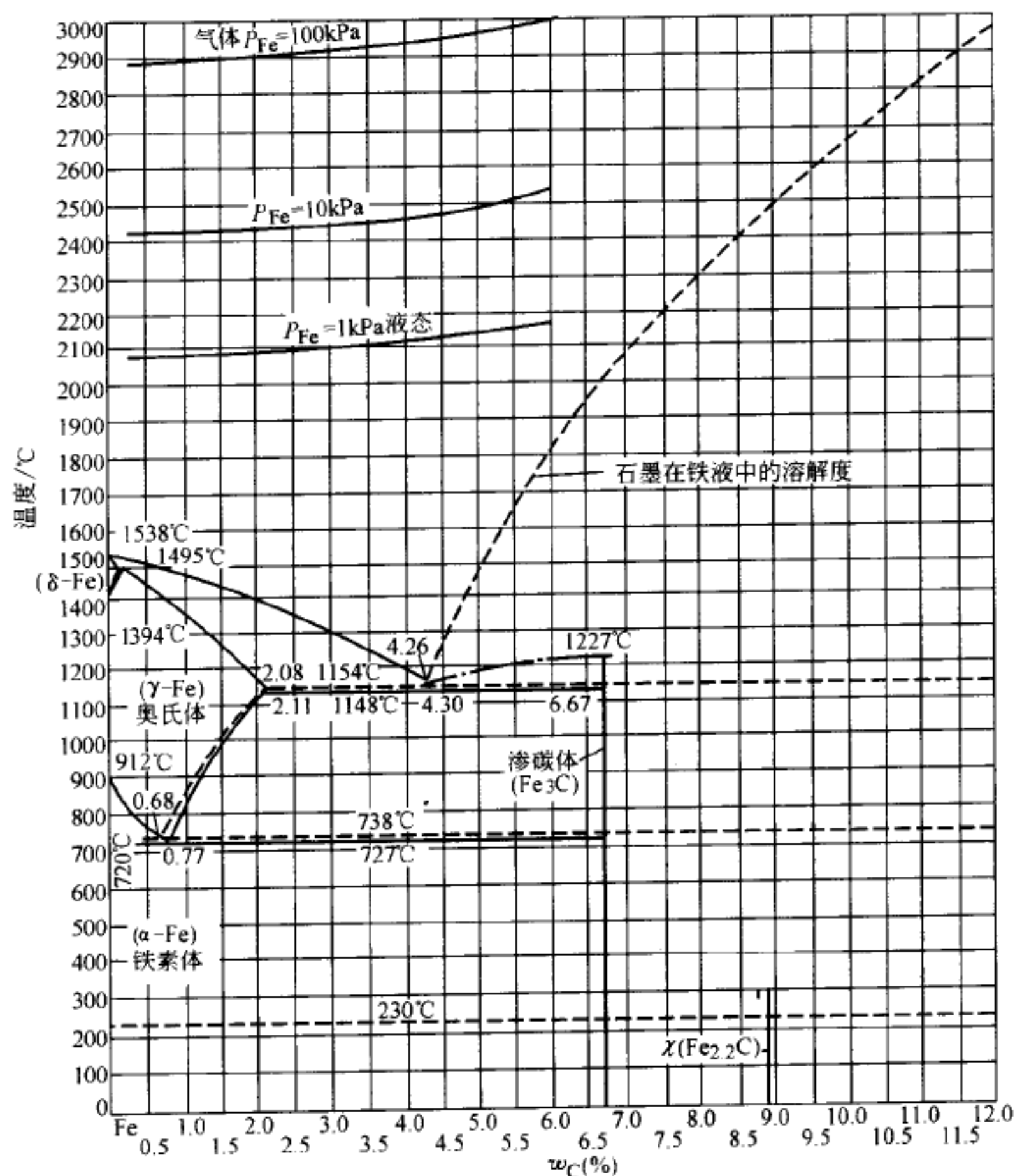
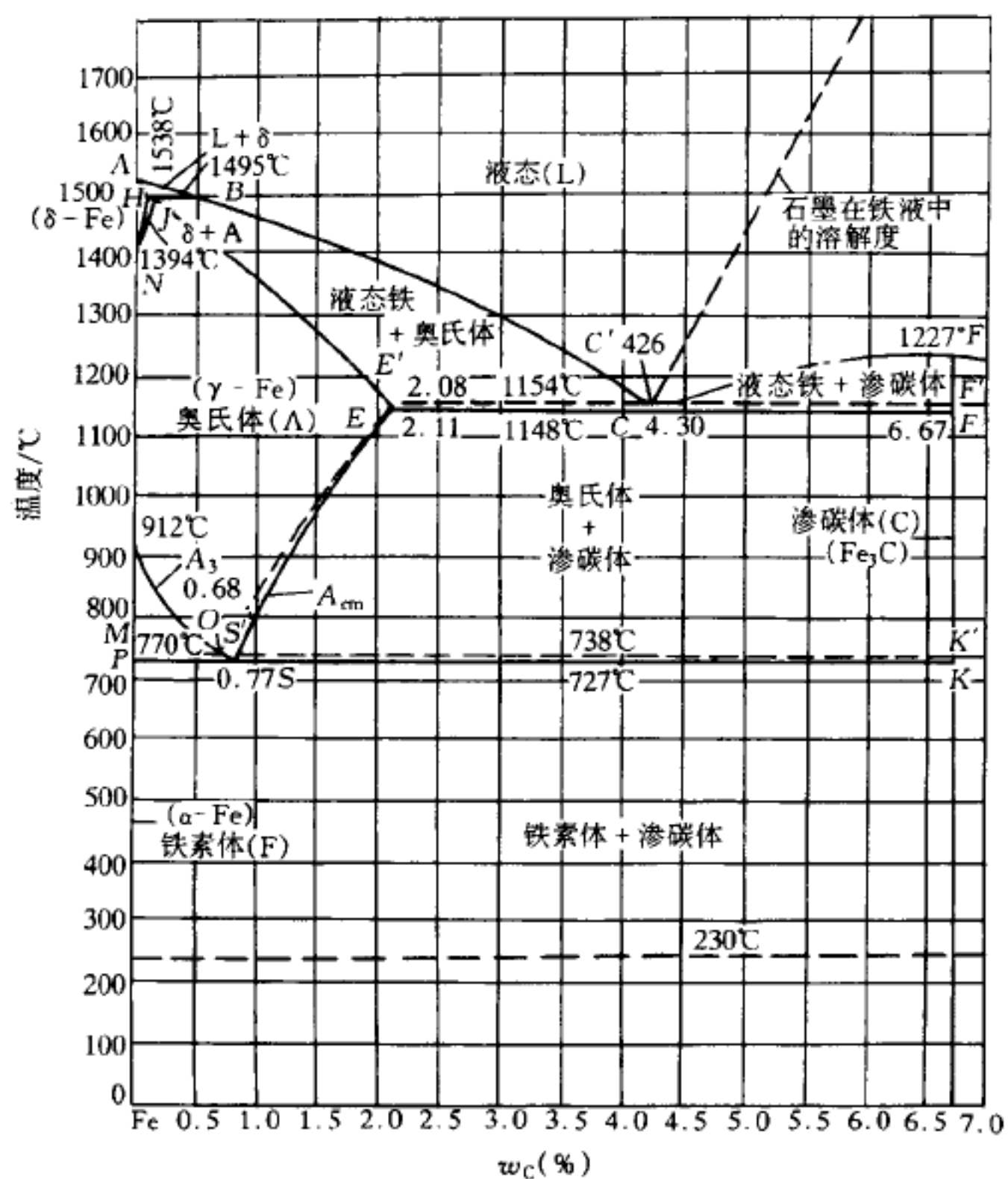
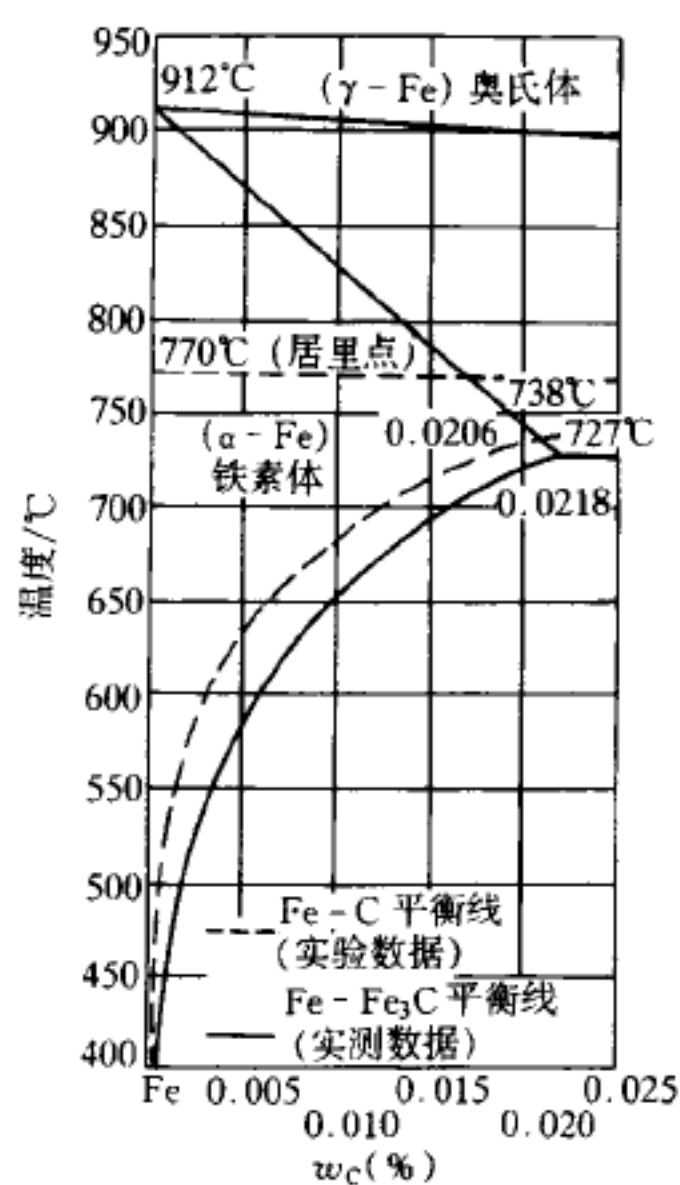
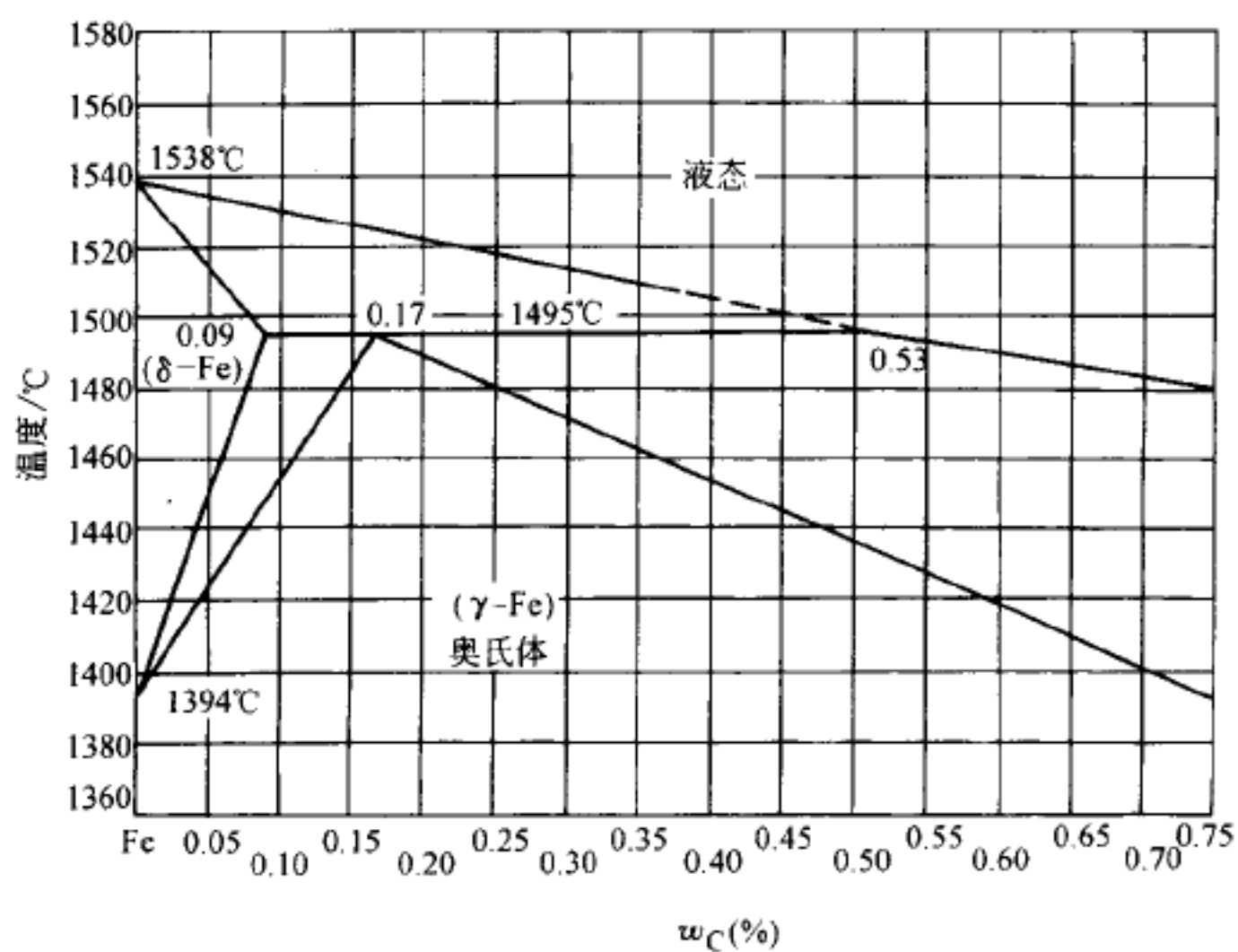


图 2-1 Fe-C 和 Fe-Fe₃C 合金相全图

- 渗碳体 (Fe₃C) 液相线 (计算)
- - - χ 碳化铁 (Fe_{2.2}C) 转变 (计算)
- 铁-渗碳体 (Fe₃C) 平衡相图 (实测)

图 2-2 Fe-C 和 Fe-Fe₃C 合金相图图 2-3 Fe-C、Fe-Fe₃C 合金相图
中的碳在 Fe 中的溶解线图 2-4 Fe-C、Fe-Fe₃C 合金相图中的高温包晶转变

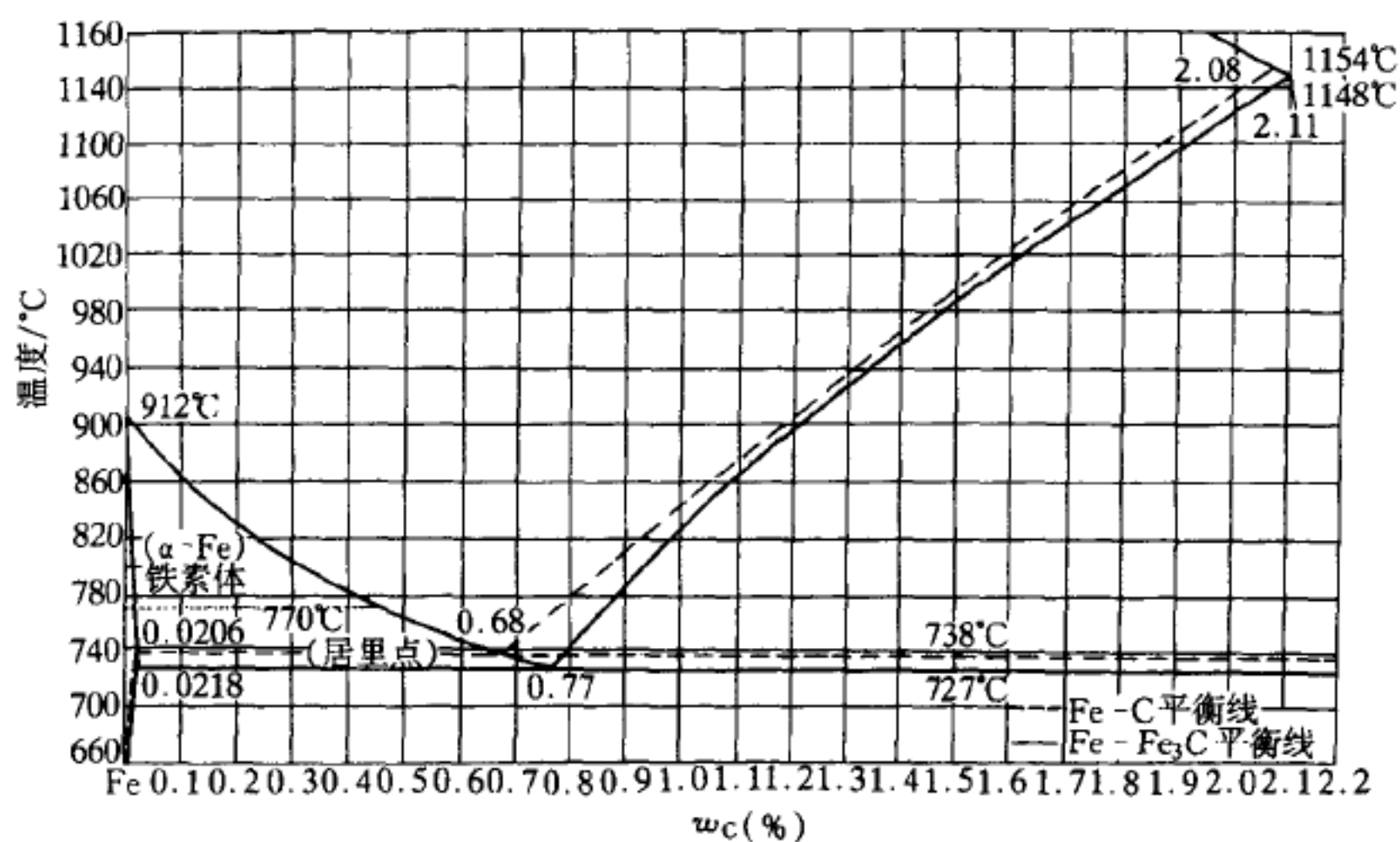
图 2-5 Fe-C、Fe-Fe₃C 合金钢的固态相变

表 2-1 Fe-C 相图中的特征点

特征点	温度/°C	碳含量 w_C (%)	说 明
A	1 538	0	纯铁熔点
B	1 495	0.17	包晶转变时, 液态合金的碳浓度
C	1 148	2.11	共晶点 $L_C \rightleftharpoons \gamma_E + Fe_3C$
D	1 227	6.69	渗碳体 (Fe_3C) 的熔点 (理论计算值)
E	1 148	2.11	碳在 γ 相中最大溶解度
F	1 148	6.69	共晶转变线与渗碳体成分的交点
G	912	0	$\alpha-Fe \rightleftharpoons \gamma-Fe$ 同素异构转变点 (A_3)
H	1 495	0.09	碳在 δ 相中的最大溶解度
J	1 495	0.17	包晶点 $L_B + \delta_H \rightleftharpoons \gamma_J$
K	727	6.69	共析转变线与渗碳体成分线的交点
M	770	0	α 相磁性转变点 (A_2)
N	1 394	0	$\gamma-Fe \rightleftharpoons \delta-Fe$ 同素异构转变点 (A_4)
O	770	≈ 0.50	α 相磁性转变点 (A_2)
P	727	0.0218	碳在 α 相中的最大溶解度
Q	≈ 600	≈ 0.005	碳在 α 相中的溶解度
S	727	0.77	共析点 $\gamma_S \rightleftharpoons \alpha_P + Fe_3C$

表 2-2 Fe-C 相图中的特性线

特性线	说 明	特性线	说 明
AB	δ 相的液相线	GOS	亚共析 Fe-C 合金的上临界点 (A_3)
BC	γ 相的液相线	ES	碳在 γ 相中的溶解度线, 过共析 Fe-C 合金的上临界点 (A_{cm})
CD	Fe ₃ C 的液相线	PQ	低于 A_1 , 碳在 α 相中的溶解度线
AH	δ 相的固相线	HJB	$\gamma_1 = L_B + \delta_H$ 包晶转变线
JE	γ 相的固相线	ECF	$L_C \rightleftharpoons \gamma_E + Fe_3C$ 共晶转变线
HN	碳在 δ 相中的溶解度线	MO	α 铁磁性转变线 (A_2)
JN	(δ + γ) 相区与 γ 相区分界线	PSK	$\gamma_S \rightleftharpoons \alpha_P + Fe_3C$ 共析反应线, Fe-C 合金的下临界点 (A_1)
GP	高于 A_1 时, 碳在 α 相中的溶解度线	230℃ 线	Fe ₃ C 的磁性转变线 (A_0)

表 2-3 Fe-C 相图中各相的特性

名 称	符 号	晶体结构	说 明
铁素体	α	体心立方	碳在 α-Fe 中的间隙固溶体, 用 F 表示
奥氏体	γ	面心立方	碳在 γ-Fe 中的间隙固溶体, 用 A 表示
δ 铁素体	δ	体心立方	碳在 δ-Fe 中的间隙固溶体, 又称高温 α 相
渗碳体	Fe ₃ C	正交系	是一种复杂的化合物
液 相	L		铁碳合金的液相

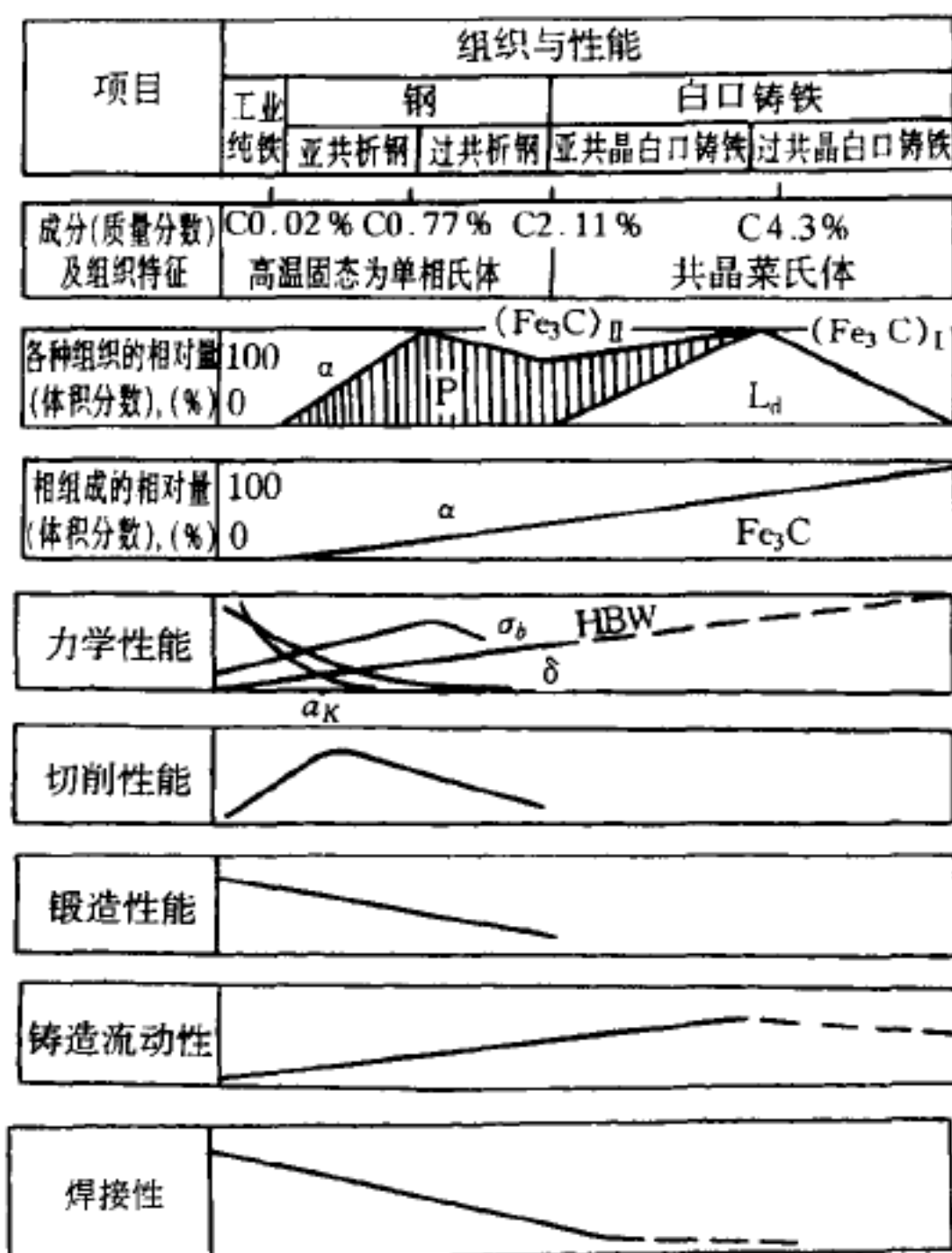


图 2-6 Fe-C 合金成分、组织、性能关系综合示意图

(Fe₃C)_I — 一次渗碳体 (Fe₃C)_{II} — 二次渗碳体

注: 国标 GB/T231.1—2002 规定布氏硬度值不论大小均用 HBW 表示

表 2-4 热处理常用的临界温度符号及说明

符 号	说 明
A_0	渗碳体的磁性转变点
A_1	在平衡状态下, 奥氏体、铁素体、渗碳体或碳化物共存的温度, 即一般所说的下临界点, 也可写为 Ae_1
A_3	亚共析钢在平衡状态下, 奥氏体和铁素体共存的最高温度, 即亚共析钢的上临界点, 也可写为 Ae_3
A_{cm}	过共析钢在平衡状态下, 奥氏体和渗碳体或碳化物共存的最高温度, 即过共析钢的上临界点, 也可写为 Ae_{cm}
A_4	在平衡状态下 δ 相和奥氏体共存的最低温度, 也可写为 Ae_4
Ac_1	钢加热, 开始形成奥氏体的温度
Ac_3	亚共析钢加热时, 所有铁素体均转变为奥氏体的温度
Ac_{cm}	过共析钢加热时, 所有渗碳体和碳化物完全溶入奥氏体的温度
Ac_4	低碳亚共析钢加热时, 奥氏体开始转变为 δ 相的温度
Ar_1	钢高温奥氏体化后冷却时, 奥氏体分解为铁素体和珠光体的温度
Ar_3	亚共析钢高温奥氏体化后冷却时, 铁素体开始析出的温度
Ar_{cm}	过共析钢高温奥氏体化后冷却时, 渗碳体或碳化物开始析出的温度
Ar_4	钢在高温形成的 δ 相冷却时, 完全转变为奥氏体的温度
B_s	钢奥氏体化后冷却时, 奥氏体开始分解为贝氏体的温度
M_s	钢奥氏体化后冷却时, 其中奥氏体开始转变为马氏体的温度
M_f	奥氏体变为马氏体的终了温度

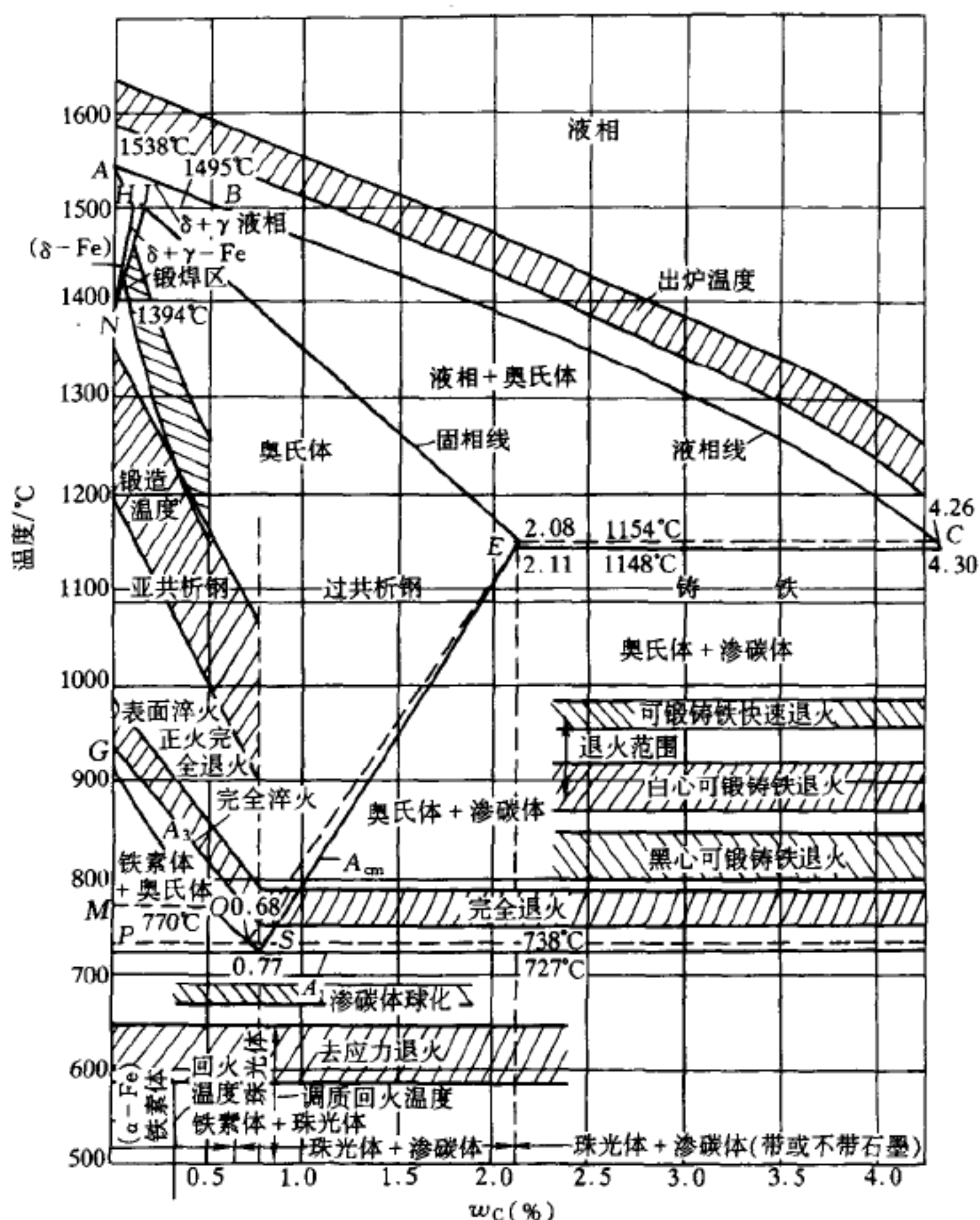
图 2-7 Fe-C 和 Fe-Fe₃C 相图与热处理温度

表 2-5 铁碳合金中各种组织的性能

组 织		硬 度 HBW	σ_b /MPa	δ (%)	α_K /kJ·m ⁻²	线膨胀系数 α /1·K ⁻¹	比体积 (20℃) /cm ³ ·g ⁻¹
铁素体		≈ 80	245 ~ 294	30 ~ 50	≈ 2942		0.1271
渗碳体		≈ 800			≈ 0		0.131 ± 0.001
奥氏体		170 ~ 220	834 ~ 1030	20 ~ 25		18 × 10 ⁻⁶ ~ 20 × 10 ⁻⁶	0.1212 + 0.0033 (%C)
珠光体	片状	190 ~ 250	804 ~ 863	10 ~ 20			0.1271 + 0.0005 (%C)
	球状	160 ~ 190	618	20 ~ 25			
索氏体		250 ~ 320	883 ~ 1079	10 ~ 20			0.1271 + 0.0005 (%C)
托氏体		330 ~ 400	1128 ~ 1373	5 ~ 10			0.1271 + 0.0005 (%C)
贝氏体	上贝氏体	42 ~ 48HRC					0.1271 + 0.0005 (%C)
	下贝氏体	50 ~ 55HRC					
马氏体	板条 (低碳)	600 ~ 700	1177 ~ 1569		≥ 588	12 × 10 ⁻⁶ ~ 14 × 10 ⁻⁶	0.1271 + 0.0005 (%C)
	片状 (高碳)						
莱氏体		> 700					

2.2 合金元素对 Fe-Fe₃C 合金相图的影响 (表 2-6 ~ 表 2-9 和图 2-8 与图 2-9)

表 2-6 合金元素在钢中的作用

元素	晶格 形状	对相图影响				影响 铁素体 α	柱状结 晶区	吸收 气体	共析 含碳	碳化物的 形 成	石墨化	导热导电	强度性质 σ_b , HBW
		A_4	A_3	A_1	γ 区								
Mn	立方复 杂晶格	↑	↓	↓	10% 扩大 ↗↘	溶入 α →	↑		↓	MnC		↓	↑
Ni	面心立 方晶体	↑	↓	↓ 加 C 时	34% 扩大 ↗↘	↓	↑	N ₂ H ₂	↓	不形成	当 Ni, C 多时促使 石墨化	↓	↑
Cu	面心立 方晶格	↑	↓	↑	↗↘				↓	不形成		↑	(< 2% 时 提高较大)
Co	六方密 集晶格	↑	↑ (w_{Co} > 7% 时) ↓ (低 w_{Co} % 时)	↑	↑ (含碳增加 时扩大) ↓ (高温时)	溶入 α →				阻止碳化 物析出	当 Co, C 多时促使 石墨化	↑ 50% ~ 60% w_{Co} 时 ↓ ≥ 50% ~ 60% w_{Co} 时	↑ 退火正 火后
Cr	体心立 方晶格		↓	↑	15% 缩小 ↘↙		↑	N ₂ H ₂	↑	Cr ₇ C ₃ 、 Cr ₂₃ C ₆		↓	↑ (回火后)
W	体心立 方晶格		↑ A_{c3} ↓ A_{r3} (w_W 6.6%)		6.6% ↘↙				↑	Fe ₂ W ₂ C、 W ₂ C、WC		↓	↑ ↓ 淬火形 成 WC

(续)

元素	晶格形状	对相图影响				影响铁素体 α	柱状结晶区	吸收气体	共析含碳	碳化物的形成	石墨化	导热导电	强度性能 σ_b , HBW
		A_4	A_3	A_1	$\gamma_{\text{区}}$								
Mo	体心立方晶体	↓	↑	↑	4.5% ↘				↓	Mo_2C 、 $\text{Fe}_2\text{Mo}_2\text{C}$ (钢中没有)		↓	↑ HB (加工后不经热处理时)

元素	晶格形状	冲击韧度 a_K	磁性 H_c, B_r	临界冷却速度 $v_{\text{临}}$	过热敏感性	脱碳	回火稳定性	回火脆性	二次硬化性	渗氮	渗碳	抗腐蚀性
Mn	立方复杂晶格	↑ ↑ (含 Mn 一定范围内)		↓ 大	↑	有脱碳影响		↑			不影响高温时 ↓	↑ 当奥氏体中碳化物不析出时
Ni	面心立方晶体	↑		↓	↓ 有细化晶粒作用						↑	↑
Cu	面心立方晶格	↑ (低碳, $w_{\text{Cu}} < 0.5\%$ 时)	↑	↓								↑ ($w_{\text{Cu}} < 0.4\%$)
Co	六方密集晶格	↓ 退火正火后	↑	↑ (Fe-Co-C)	抗热		↑ 含 Co 多时				↓	↑ 含碳量少时
Cr	体心立方晶格	不影响 $w_{\text{Cr}} < 1\%$ ~ 1.5% 时	↑	↑ 有时 ↓	↓ 使 γ 不易长大		↑	↑ 高温 Mn、P 多时	有	与 N 有大的亲和力 CrN 、 Cr_2N	↑ $w_{\text{Cr}} < 1.5\%$	↑ 形成 Cr_2O_3
W	体心立方晶格		↑	↓ (W 少碳多时)	抗热 ↓ 细化晶粒	挥发性脱碳	↑	↓			↑	
Mo	体心立方晶格	淬、回火后不影响 ↓ 加工后不经热处理时	↑	↓ 与碳一定比例时	↓ (有细化晶粒作用)	挥发性脱碳	↑	↓			↑	↑ 加入到不锈钢中时

元素	晶格形状	对相图影响				影响铁素体 α	柱状结晶区	吸收气体	共析含碳	碳化物的形成	石墨化	导热导电	强度性质 σ_b , HBW
		A_4	A_3	A_1	$\gamma_{\text{区}}$								
V	体心立方晶格	↑	↑ ↓ 当含碳增多时	↑ → 当含碳增加时	1.1% ↘	→			↑	当 C 多时 VC 、 V_4C_3		↑	↓ 碳含量一定时 ↑ σ_s 、 σ_b
Ti	六方密集晶格		↑	↑	1.0% ↘	→			↑	TiC			↑ (回火时)
Be	六方密集晶格			↑	0.2% ↘	↓ 当碳增加时 → 比 Ti 溶入大				Be_2C			↑ (回火时)

(续)

元素	晶格形状	对相图影响				影响铁素体 α	柱状结晶区	吸收气体	共析含碳	碳化物的形成	石墨化	导热导电	强度性质 σ_b , HBW
		A_4	A_3	A_1	$\gamma_{\text{区}}$								
B	六方密集晶格	↓	↑	↑	↘↙						B_6C B_4C		↑ (回火时)
Si	立方(金刚石)	↓	↑	↑	1.7% ↘↙	溶入 α →			↓	有时形成 SiC 一般不形成	强烈石墨化		↑ (增加 α 相的硬度、强度) ↑ σ_s 、 σ_b
Al	面心立方晶格	↓	↑ ↓ Ar_3		1.0% ↘↙	溶入 α 比 Si 大 →			↓	一般不形成 当 Al 多时有可能	含碳高时促使石墨化 (比 Si 高)		↑ (疲劳强度)
元素	晶格形状	冲击韧度 α_K	磁性 H_c, B_r	临界冷却速度 $v_{\text{临}}$	过热敏感性	脱碳	回火稳定性	回火脆性	二次硬化性	渗氮	渗碳	抗腐蚀性	
V	体心立方晶格	↑ 与 Ni 同	↑ VC 未全溶时	↓	↓ (有细化晶粒作用)			↓		VN	↑	↑ 加入到不锈钢中时	
Ti	六方密集晶格		↑		抗热 ↓ 细化晶粒					TiN		↑ 加入到不锈钢中时	
Be	六方密集晶格	几乎不影响	↑	↓			↑	↓					
B	六方密集晶格	不影响		↓ (w_B 0.0004%)	↓ 有细化晶粒作用								
Si	立方(金刚石)	↑ 含 Si 一定时	↑	↓ 含 Si 少时 ↑ 含 Si 多时	无细化晶粒作用, 近来认为有抗热性	机械性脱碳	↑	↓ ↑ (有时)			↑	↑ w_{Si} > 1.2% 时	
Al	面心立方晶格	↑ ↓ 有时	↓ 比 Si 小		抗热 ↓ 细化晶粒	机械性脱碳				形成 AlN	↑	↑	

注: ↑表示影响强烈。

表 2-7 合金元素在钢中的存在形式

存 在 形 式	合 金 元 素
在奥氏体、铁素体中形成固溶体, 不形成碳化物	Si、Al、Cu、Ni、Co
极易形成碳化物, 仅在缺少碳时, 才进入固溶体	V、Zr、Nb、Ti、Ta、Cr、Mo、W
部分进入固溶体、部分进入渗碳体置换一部分铁原子, 也形成特殊化物	Mn [(Fe, Mn) ₃ C]、Cr [(Fe, Cr) ₃ C]、(Fe, Cr) ₇ C ₃ 、(Fe, W) ₆ C
易和氧、氮化合形成氧化物和氮化物, 成为钢中夹杂	Al (Al ₂ O ₃ 、AlN)、Mn、Si (MnO·SiO ₂)、Ti (TiO ₂ 、TiN)、Zr (ZrN)
和硫化合形成硫化物夹杂和铁镍化合形成金属间化合物	Mn、Zr、Se Si (FeSi)、Cr (FeCr)、W (Fe ₂ W) Ti (Fe ₂ Ti)、Ni (Ni ₃ Ti)

表 2-8 合金元素和有害元素在 α -Fe 和 γ -Fe 中最大溶解度

元素	在 α -Fe 中		在 γ -Fe 中		元素	在 α -Fe 中		在 γ -Fe 中	
	温度/℃	溶解度 (质量分数) (%)	温度/℃	溶解度 (质量分数) (%)		温度/℃	溶解度 (质量分数) (%)	温度/℃	溶解度 (质量分数) (%)
Al	1 094	36	1 150	0.625	Ni	~ 415	7		无限
As	841	11.0	1 150	1.5	O	910	0.03	910 ~ 1 390	0.002 ~ 0.003
B	913	0.002	1 161	0.021	P	1 049	2.55	1 152	0.3
Be	1 165	7.4	1 100	0.2	Pd	816	6.1		无限
C	727	0.0218	1 148	2.11	S	914	0.020	1 370	0.065
Co	600	76		无限	Sb	1 003	~ 34	1 154	2.5
Cr		无限	~ 1 050	12	Si	1 275	13	~ 1 150	~ 2
Cu	851	2.1	1 096	~ 9.5	Sn	751	~ 17.9	~ 1 100	~ 1.5
Mn	< 300	> 3		无限	Ti	1 291	9	1 150	0.70
Mo	1 450	37.5	~ 1 150	~ 4	V		无限	1 120	1.4
N	590	0.1	650	2.8	W	1 554 ± 6	35.5	1 150	~ 4
Nb	989	1.8	1 220	2.6	Zr	926	0.8	1 308	~ 2

表 2-9 合金元素在退火钢中的分布倾向

元素	溶于铁素体中	结合于碳化物中	进入非金属夹杂物	进入金属间化合物	游离状态
Al	Al	(?)	Al ₂ O ₃ 、FeO、Al ₂ O ₃ 、AlN	Fe _x Al	
B	B	—		Fe _x B	
Ni	Ni	—		Ni ₃ Ti、Ni ₃ Al	
Co	Co	—		(FeCo)	
Si	Si	—	SiO ₂ ·M _x O _y	FeSi	
Mn	Mn	—	MnS、MnO·SiO ₂		
Cr	Cr	—	Cr _x O _y 、FeO·Cr ₂ O ₃	FeCr	
Mo	Mo	—			
W	W	—		Fe ₂ W	
Ta	Ta	—	TaN		
V	V	—	V _x O _y 、V _x N _y		
Nb	Nb	—	NbN		
Zr	Zr	—	ZrO ₂ 、Zr _x N _y		
Ti	Ti	—	FeO·TiO ₂ 、Ti _x N _y	Fe ₂ Ti	

(续)

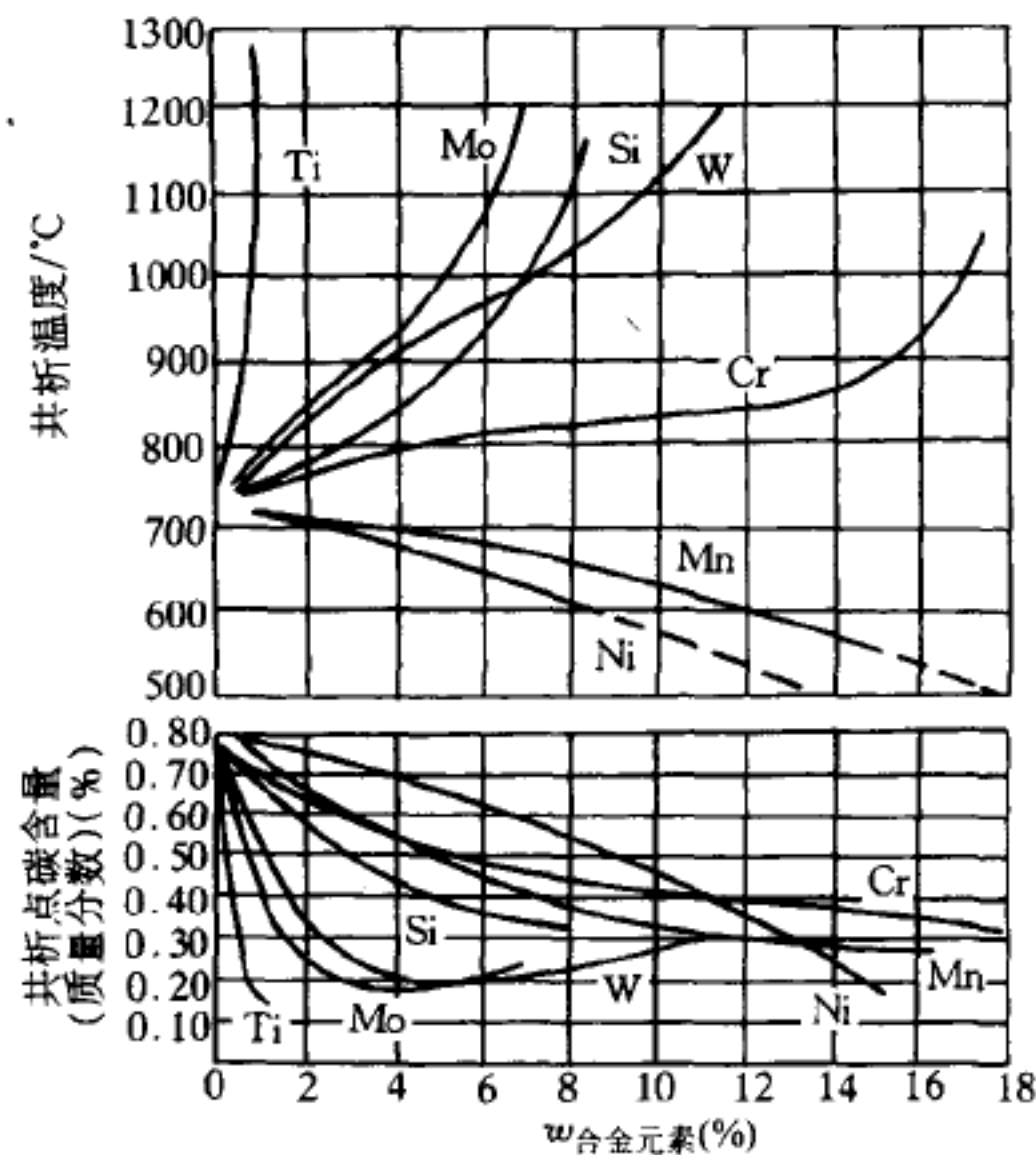
元素	溶于铁素体中	结合于碳化物中	进入非金属夹杂物	进入金属间化合物	游离状态
P	P	—	(Mn, Fe) S、ZrS PbS		$w_{Cu} > 0.8\%$ 时 Pb
S	S	—			
Cu	Cu	—			
Pb	—	—			

- 形成连续的 γ 相固溶体(A-I型)
- 形成封闭的 γ 相区(B-I型)
- ▲ 不溶解的
- 扩大 γ 相区(A-II型)
- 缩小 γ 相区(B-II型)

— 粗线区内为在钢中形成碳化物的元素

周期	I A	II A	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII	IX	X	IB	II B	III A	IV A	V A	VI A	VII A	0
1	1 H																1 H	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57-71 La-Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89-103 Ac-Lw															

57-71	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
La系	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
89-103	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Ac系	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw

图 2-8 周期表中各有关元素对铁碳相图中 γ 相区的影响图 2-9 几种合金元素对共析温度 (A_1) 及共析点碳含量的影响

2.3 钢中碳化物结构和性质 (表 2-10 和表 2-11)

表 2-10 钢中碳化物的结构和性质

碳化物	类型	晶格	晶胞中 原子数	r_c/r_m ①	晶格常数 / 10^{-8}cm	熔点 / $^{\circ}\text{C}$	硬度 (换算值) HV	备 注
TiC ZrC NbC TaC VC	TiC	面心 立方	8 (4Me + 4C)	0.53 0.48 0.53 0.53 0.57	4.32 4.685 4.458 4.445 4.15 或 4.30	3 410 3 805 3 720 ± 125 4 150 ± 140 3 023	3 200 2 600 2 400 1 800 2 500 ~ 2 800	TiC 型碳化物硬度 高、稳定、不易溶 于奥氏体 不锈钢中常用 Ti、 Nb 固定碳避免晶间 腐蚀 TiC 微粒能阻止晶 粒长大 工具钢中加入少 量 V, 形成 VC, 可 增加耐磨性, 细化 晶粒 高速钢中析出 VC, 引起二次硬化
W ₂ C Mo ₂ C Fe _{2.4} C	W ₂ C	密排 六方	3 (2Me + C)	0.55 0.58 0.61	$a = 2.986$ $c/a = 1.578$ $a = 3.001$ $c/a = 1.573$ $a = 2.755$ $c/a = 1.579$	3 130 2 690 ± 50	3 000 1 800 ~ 2 200	高速钢中析出 W ₂ C, 引起二次硬 化 高速钢中析出 Mo ₂ C, 引起二次硬 化 回火第一阶段的 马氏体分解产物, 介稳定相
WC MoC	WC	简单 六方	2 (1Me + 1C)	0.55 0.56	$a = 2.900$ $c/a = 0.975$ $a = 2.893$ $c/a = 0.969$	2 867 2 960 ± 50	2 400 ~ 2 740 2 250	含 W 工具钢退火 和高温回火时析出 稳定碳化物, 增加 耐磨性
Cr ₂₃ C ₆ Fe ₂₁ W ₂ C ₆ Fe ₂₁ Mo ₂ C ₆	M ₂₃ C ₆	复杂 立方	116 (92Me + 24C)	0.61	10.63	≈ 1 550	1 000 ~ 1 520	Cr13 型不锈钢中 的碳化物 退火高速钢中的 碳化物 退火钼高速钢中 的碳化物
Cr ₇ C ₃	Cr ₇ C ₃	三斜	80 (56Me + 24C)	0.61	$a = 13.98$ $c = 4.53$	1 670	1 820	高碳高铬工具钢 Cr12 钢中碳化物
Fe ₃ C Mn ₃ C	Fe ₃ C	复杂 正交	16 (12Me + 4C)	0.61	$a = 4.6155$ $b = 5.0773$ $c = 6.7265$	1 330	1 150 ~ 1 340	结构钢、工具钢 中的碳化物, 其中 常溶入一定合金元 素
Fe ₄ W ₂ C Fe ₄ Mo ₂ C	M ₆ C	复杂 立方	112 (96Me + 16C)		11.1 11.08	1 890 1 890		高速钢退火后及 淬火未溶的碳化物 钼高速钢退火后 及淬火未溶的碳化 物

① 碳化物中的碳和其他元素的原子半径比值。

表 2-11 常见碳化物和金属间化合物点阵结构

化合物	晶型	点阵参数/ $\times 10^{-8}\text{cm}$			晶胞中原子数
		a	b	c	
(Cu, W) ₆ C	立方	10.9 ~ 11.5			112 (金属 96, C16)
(Cr, Fe) ₂ C	面心立方, 具有点阵缺陷	3.618			
Cr ₃ C ₂	正交	11.48	5.63	2.827	20 (Cr12, C8)
Cr ₇ C ₃	六角 (菱形)	14.0		4.532	80 (Cr56, C24)
Cr ₂₃ C ₆	立方	10.53 ~ 10.66			116 (Cr92, C24)
FeAl	简单立方	2.89			2
Fe ₃ Al	面心立方	5.78			16
FeB	正交	4.05	5.50	2.95	8
Fe ₂ B	四方	5.10		4.24	12
Fe ₃ C	正交	4.524	5.089	6.743	16 (Fe12, C4)
FeCo	简单立方	2.8504			2
(Fe, Mo) ₆ C } (Fe, W) ₆ C }	立方	11.05 ~ 11.09			112 (金属 96, C16)
Mo ₂ C	六角	3.00		4.72	3
NbC	立方	4.44 ~ 4.46			8 (Nb4, C4)
NiAl	简单立方	2.88			2
NiAl ₃	正交	6.60	7.35	4.80	16
SiC	六角 (另有多种交角及菱形结构)	3.08		10.08	8
TiAl	四方	3.99		4.07	2
TiAl ₃	四方	5.436		8.596	8
TiC	面心立方	4.311			8 (Ti4, C4)
VC	立方	4.14 ~ 4.31			8 (V4, C4)
WC	六角	2.916		2.844	2
W ₂ C	六角	2.937		4.722	3
ZrC	立方	4.66 ~ 4.68			8 (Zr4, C4)

2.4 合金元素对钢组织、热处理工艺、力学性能、物理性能、化学性能和加工工艺性能的影响

1. 合金元素对钢组织的影响 (表 2-12)

表 2-12 合金元素对钢组织的影响

影 响 方 面	合 金 元 素
对奥氏体化过程的影响	
加速	Co
延缓	Ti、V、Mo、W
对奥氏体等温转变的影响	

(续)

影 响 方 面	合 金 元 素
保持等温转变图形状、向右移	Si、P、Ni、Cu 等不形成碳化物元素和弱形成碳化物元素
等温转变图明显右移, 珠光体和贝氏体转变曲线分开	强形成碳化物元素 Ti、V、Cr、Mo、W
使等温转变图左移	Co
对连续冷却转变图的影响	
降低奥氏体分解或转变温度	使等温转变图向右移的元素
降低奥氏体分解或转变温度	使等温转变图向左移元素, 如 Co, Al
对马氏体转变的影响	
降低 M_s 点	C、Mn、V、Cr、Ni、Cu、Mo、W
影响 M_s 点不明显	Si、B
提高 M_s 点	Co、Al
对奥氏体晶粒度的影响	
阻碍晶粒长大	Ti、V、Ta、Zr、Nb 和少量 W、Mo 等形成稳定难溶碳化物元素 N、O、S 等形成高熔点非金属夹杂物和金属间化合物元素
	Si、Ni、Co 等促进石墨化元素
	Cu 结构上自由存在的元素
	Cr 等形成比较易溶解碳化物的元素
	Mn、P
	比较复杂、不是简单叠加
对 Fe-C 相图奥氏体区的影响	
缩小和封闭 γ 区	Cr、W、Mo、Si、V、Ti 等
扩大 γ 区或影响很小	Ni、Mn、Co 等

2. 合金元素对热处理工艺的影响 (表 2-13)

表 2-13 合金元素对热处理工艺的影响

影 响 方 面	合 金 元 素
对热处理加热温度的影响	
提高退火、淬火、回火温度	Cr、Co、V、Al、Ti
增加过热敏感性	C、Mn、Cr
降低过热敏感性	W、Mo、Ti、V、Ni、Si、Ta、Co
不宜在高温加热	Mo
对热处理加热时间的影响	
不宜长时退火, 以免降低淬火硬度	含 W 钢
必须适当延长淬火加热时间	含 Cr、W、V 钢
对反复热处理不敏感	W 钢
对化学热处理的影响	

(续)

影 响 方 面	合 金 元 素
促进对氮的吸收	Al、Cr、Ta
促进对碳的吸收	Cr、W、Mo、V
对高温渗碳温度敏感	Cr、Mo、Mn
对钢淬透性的影响	
提高淬透性	易使晶粒长大的元素，如 Mn。降低奥氏体转变临界冷速的元素，如 C、P、Si、Ni、Cr、Mo、B、Cu、As、Sb、Be、N
降低淬透性	使晶粒细化的元素，如 Al。提高奥氏体转变临界冷速的元素，如 S、V、Ti、Co、Nb、Ta、W、Te、Zr、Se
例外	V、Ti、Nb、Zr、W 等强碳化物形成元素形成碳化物时降低淬透性、溶入固溶体则相反
对回火稳定性的影响	
提高回火稳定性	V、W、Ti、Cr、M、Co、Si
作用不明显	Al、Mn、Ni
对回火脆性的影响	
促使回火脆性	Mn、Cr、N、P、V、Cu、Ni
防止或延迟回火脆性	Be、Mo、W
对回火二次硬化的影响	
残留奥氏体转变	Mn、Mo、W、Cr、Ni、Co、V
沉淀硬化	V、Mo、W、Cr、Ni、Co

3. 合金元素对钢力学性能的影响 (图 2-10 ~ 图 2-14)

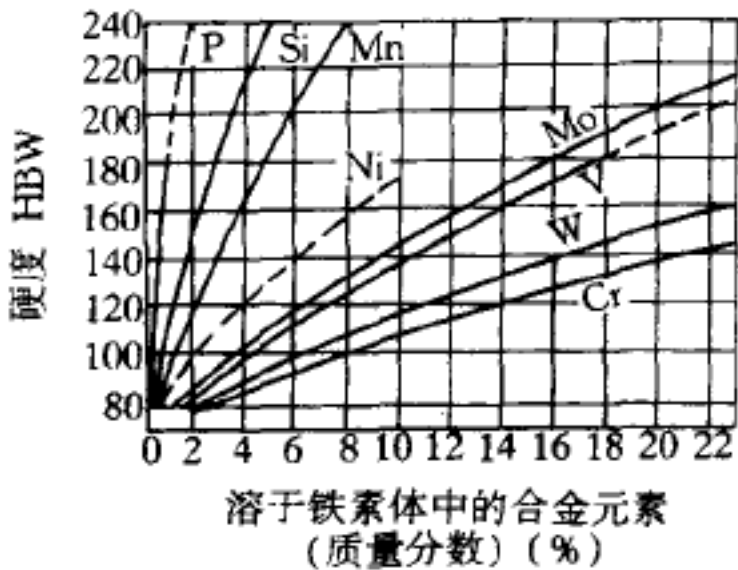


图 2-10 各种合金元素对铁素体固溶硬化作用

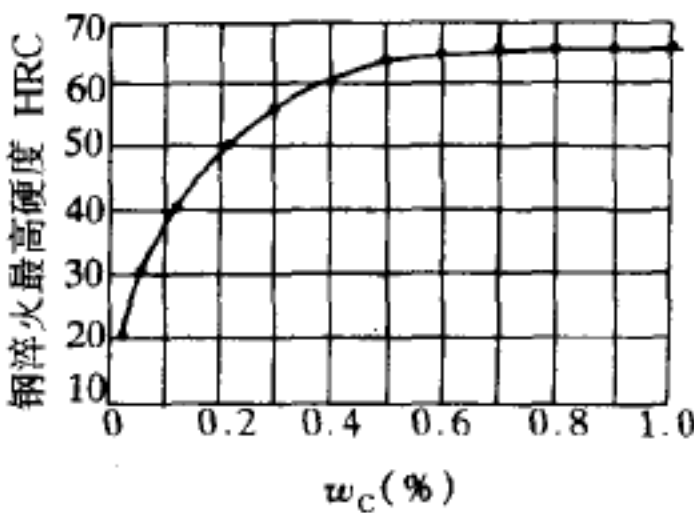


图 2-11 马氏体碳含量与最高硬度的关系

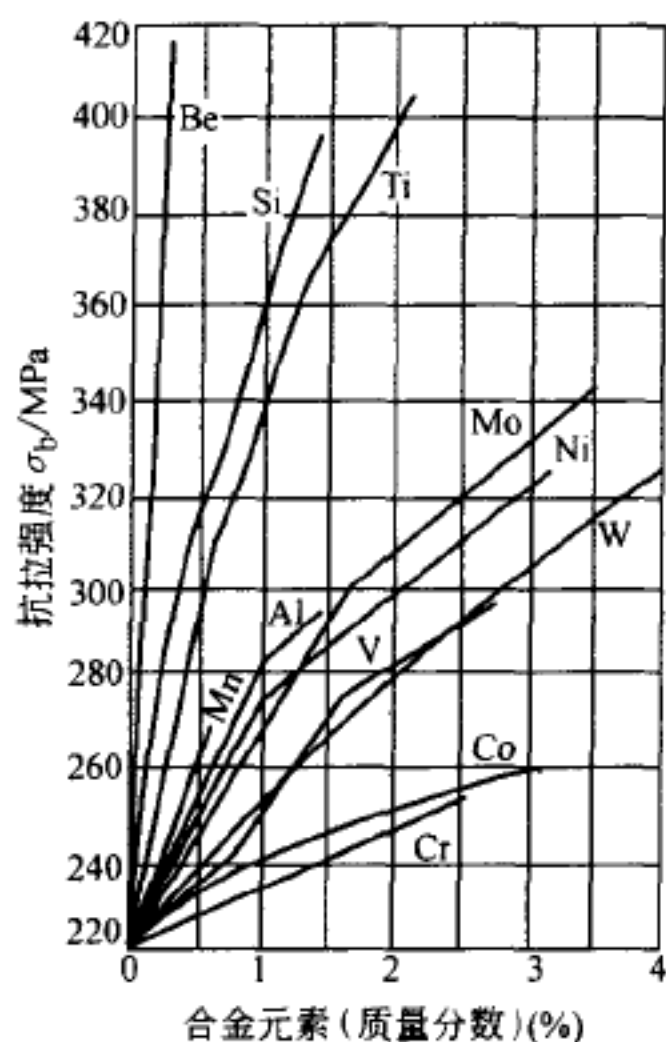


图 2-12 不同的合金元素含量
对抗拉强度的影响

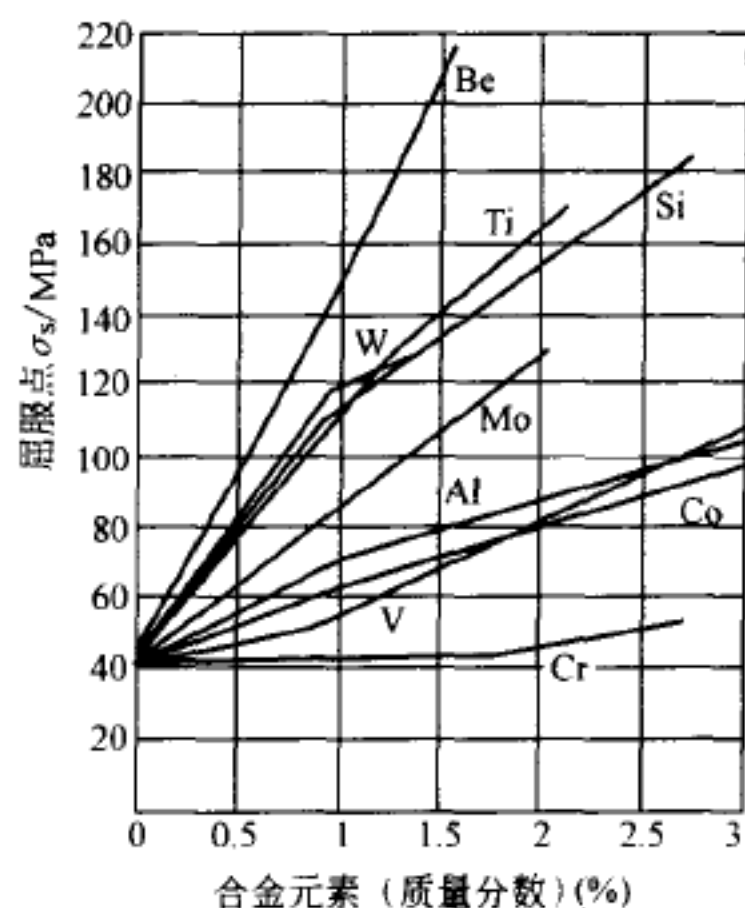


图 2-13 不同的合金元素含量
对屈服点的影响

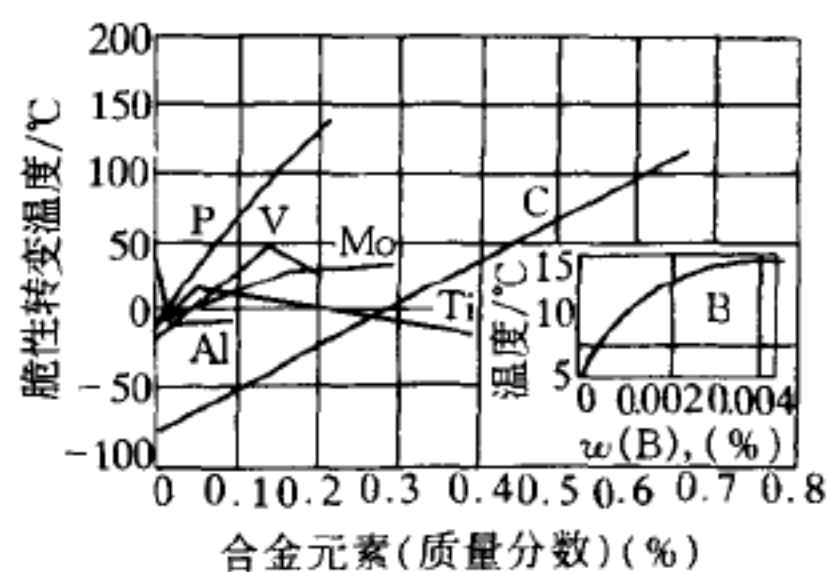
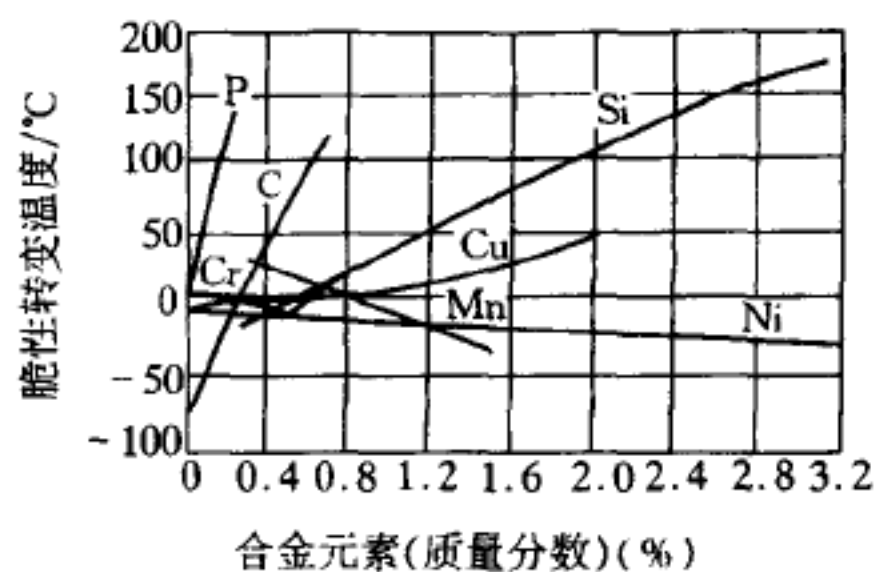


图 2-14 合金元素对脆性转变温度的影响

(以 $w_C = 0.3\%$, $w_{Mn} = 1.0\%$, $w_{Si} = 0.3\%$ 的钢的脆性转变温度为
基础, 分别加入其他合金元素后对其脆性转变温度的影响)

4. 合金元素对钢物理性能的影响 (图 2-15 ~ 图 2-18)

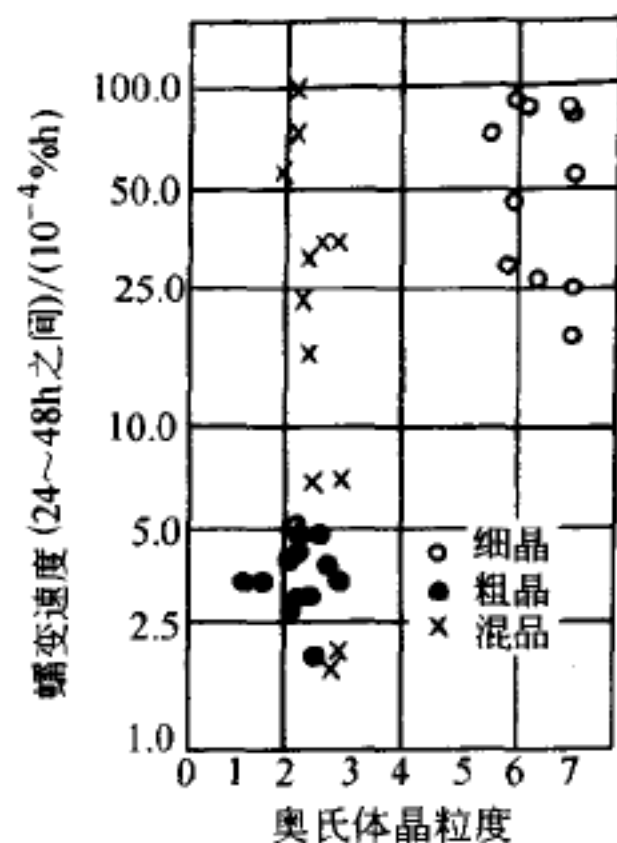


图 2-15 奥氏体晶粒大小
与蠕变速度的关系

(试验温度: 600°C; 载荷 50MPa)

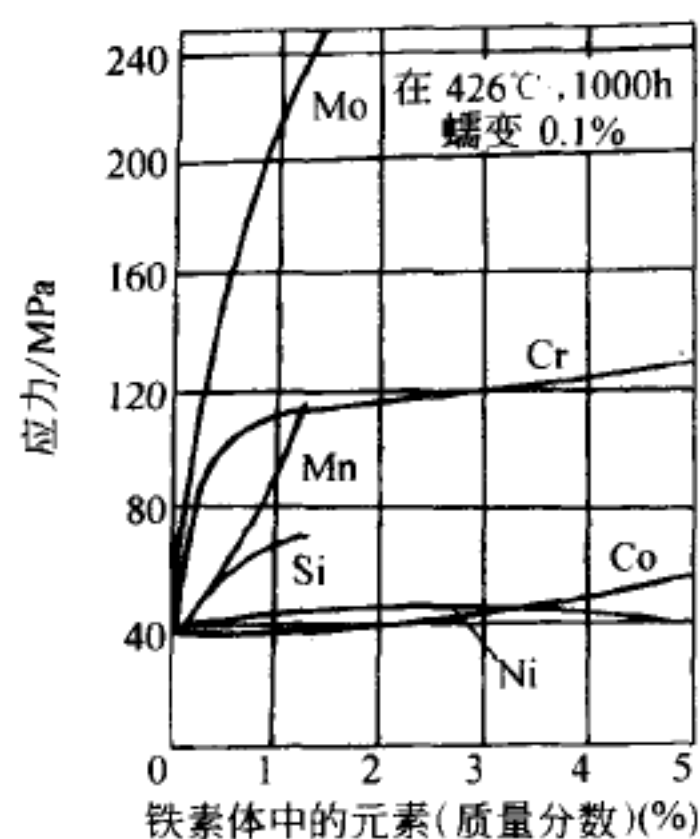


图 2-16 几种合金元素对铁素
体蠕变强度的影响

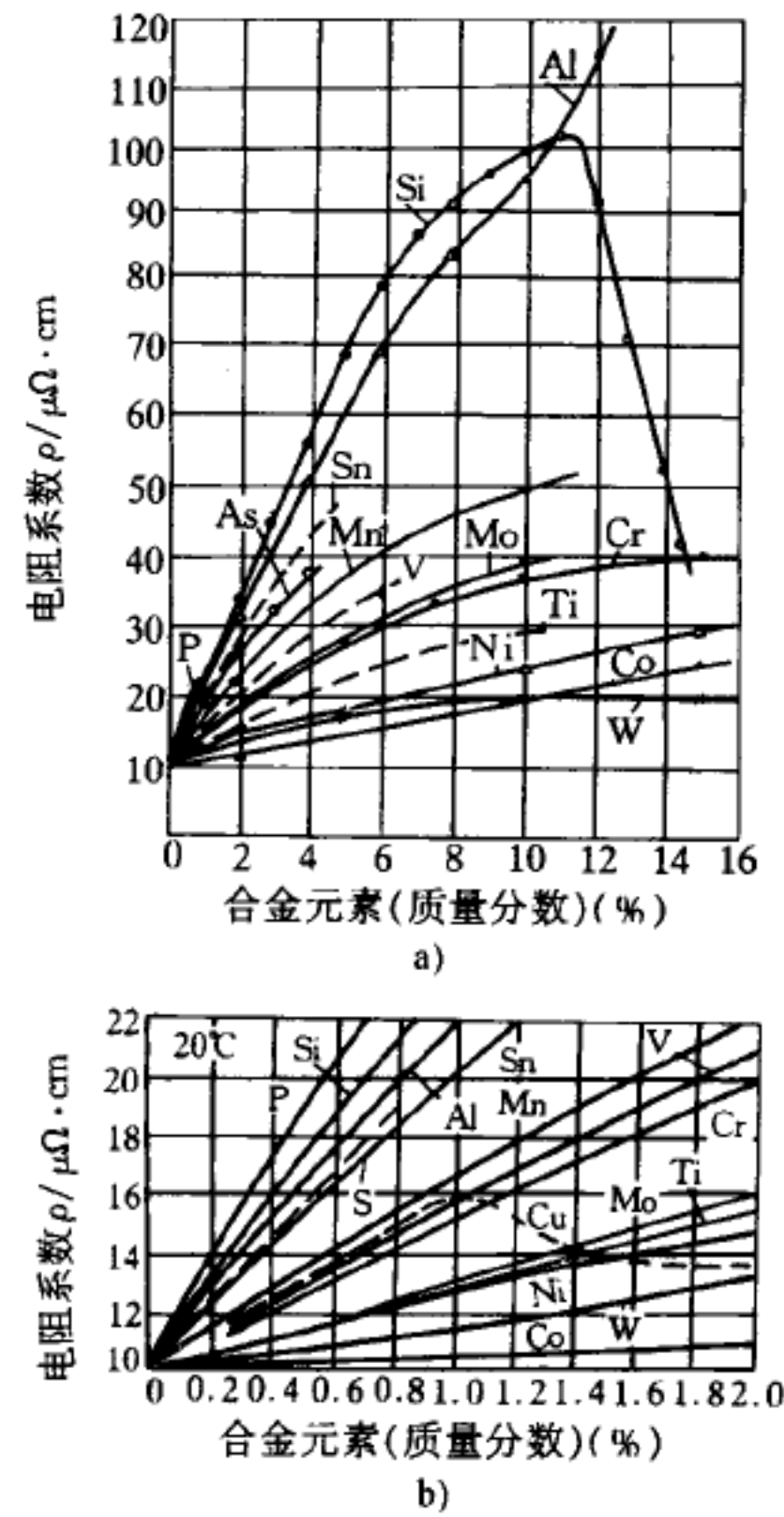


图 2-17 各种合金元素对铁的电阻系数的影响 (20℃时)

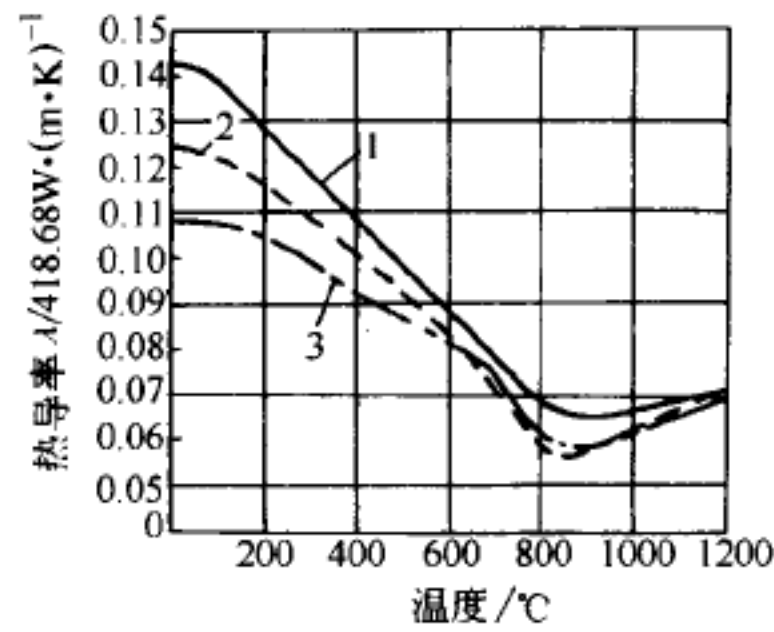


图 2-18 不同碳含量的碳素钢在不同温度时对热导率的影响
1— $w_C = 0.08\%$ 2— $w_C = 0.42\%$
3— $w_C = 1.22\%$

5. 合金元素对钢化学性能的影响 (表 2-14)

表 2-14 合金元素对钢化学性能的影响

化 学 性 能	元 素 的 影 响
高温氧化	Fe-Fe ₃ C 合金的抗高温氧化性能很差, 加入 Cr、Si、Al 等元素, 在钢表面形成致密氧化物, 保护钢材表面不继续氧化
高温含硫气体腐蚀	含 Ni 钢的抗硫腐蚀性很差, 无 Ni 的 Cr-Al-Si 钢具有较强的抗硫腐蚀能力
低温、常温和零下的表面化学性能变化	由于液体和气体腐蚀介质在钢表面产生局部伏特电池效应而导致腐蚀。采用含高 Ni、Cr 的单相奥氏体不锈钢可避免和明显缓和这种电解腐蚀作用。Al 在钢中也能起到减少表面腐蚀作用。提高碳对钢的抗大气腐蚀能力不利。随碳量增加, 抗晶间腐蚀能力明显降低。加入一定量的 Ti 或 Nb 可改善。Cu 和 P 能提高钢抗大气腐蚀能力。Cu 也可提高油漆层的附着力。含 Cu 钢也是优良的建筑钢材

6. 合金元素对钢材加工工艺性的影响 (表 2-15)

表 2-15 合金元素对钢材加工工艺性的影响

工 艺 性 能	元 素 影 响
焊接性	V、Ti、Nb、Zr 改善钢的焊接性，P、S、C、Si 恶化焊接性。一般提高钢淬透性的元素都降低焊接性
切削加工性	加入 S、Mn 在钢中易生成均匀分布的 MnS 夹杂，切削时易断屑。在优质钢中加入少量 Pb，亦可改善切削加工性。此外，还要采取适当的热处理使钢材硬度适中
冷作加工性	S、P 等元素易使钢变脆，冷作性能差，C、Si、P、S、Ni、Cr、V、Cu 等元素都会降低钢的深冲压、拉延性能。Al 有细化晶粒作用，含少量 Al 的钢可提高深冲压、拉延后的钢板表面质量
回火稳定性	Cr、Ni、W、Mo 等固溶于钢中的合金元素可提高钢的回火稳定性，即延缓回火时的硬度降低速度，提高硬度开始降低温度

2.5 钢在加热过程中的转变 (图 2-19 ~ 图 2-38, 表 2-16 ~ 表 2-18)

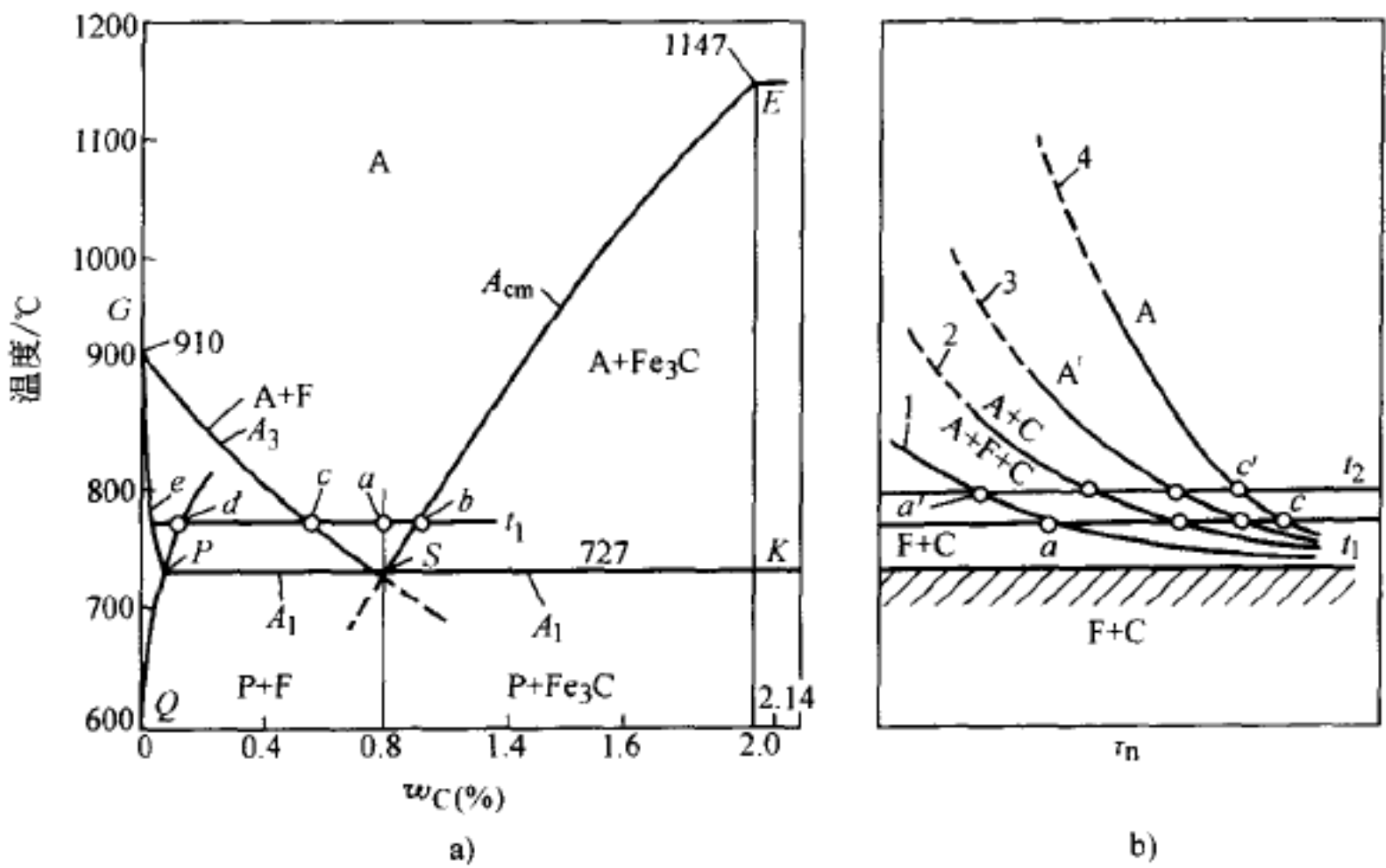


图 2-19 钢的铁素体、渗碳体组织加热时的相变
a) 加热相变 b) 奥氏体的等温形成
1—开始形成奥氏体 2—珠光体—奥氏体转变终止
3—碳化物完全溶解 4—奥氏体的均匀化

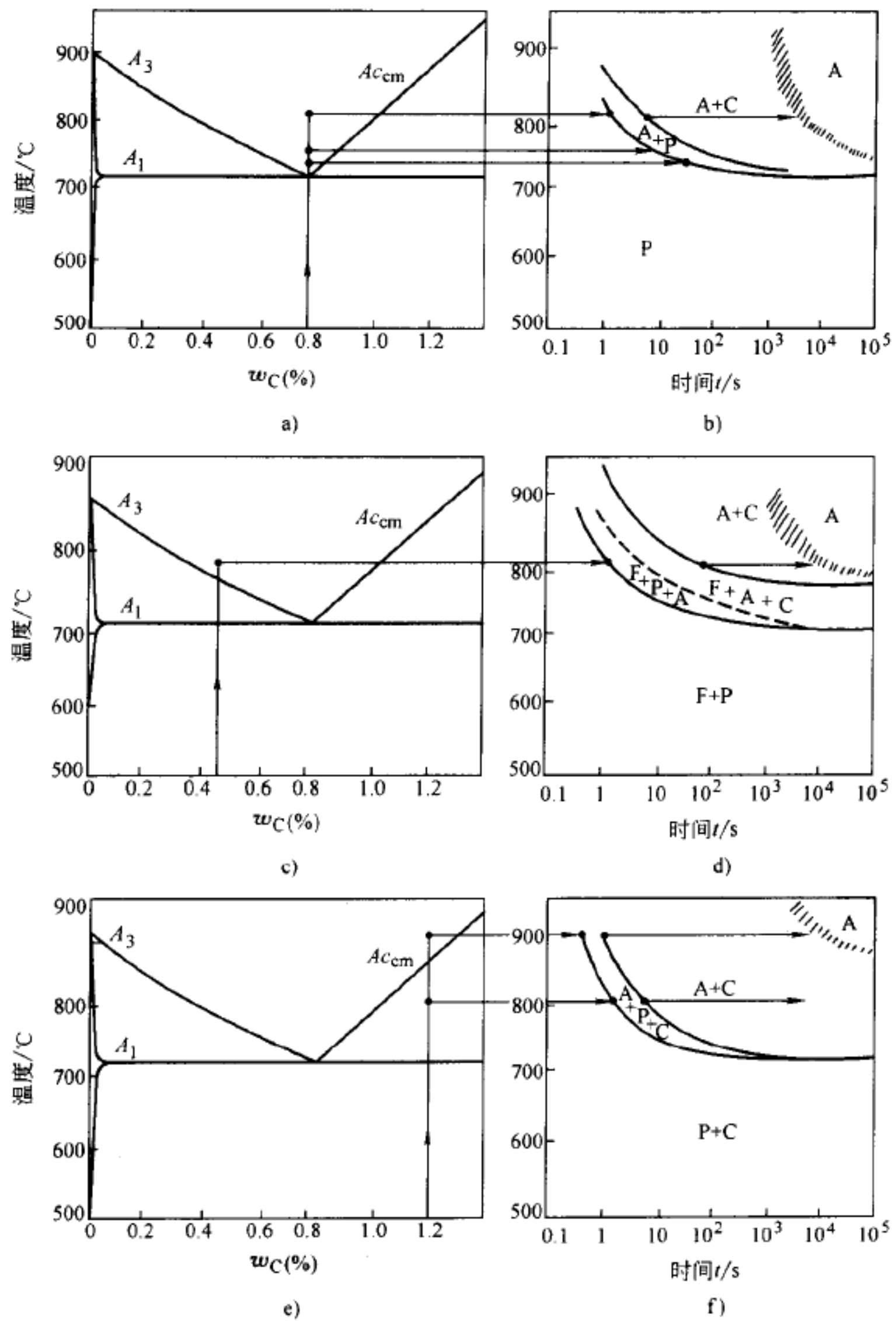


图 2-20 $w_C = 0.8\%$ (a, b)、 $w_C = 0.45\%$ (c, d) 和 $w_C = 1.2\%$ (e, f) 钢的等温奥氏体化过程中的组织转变

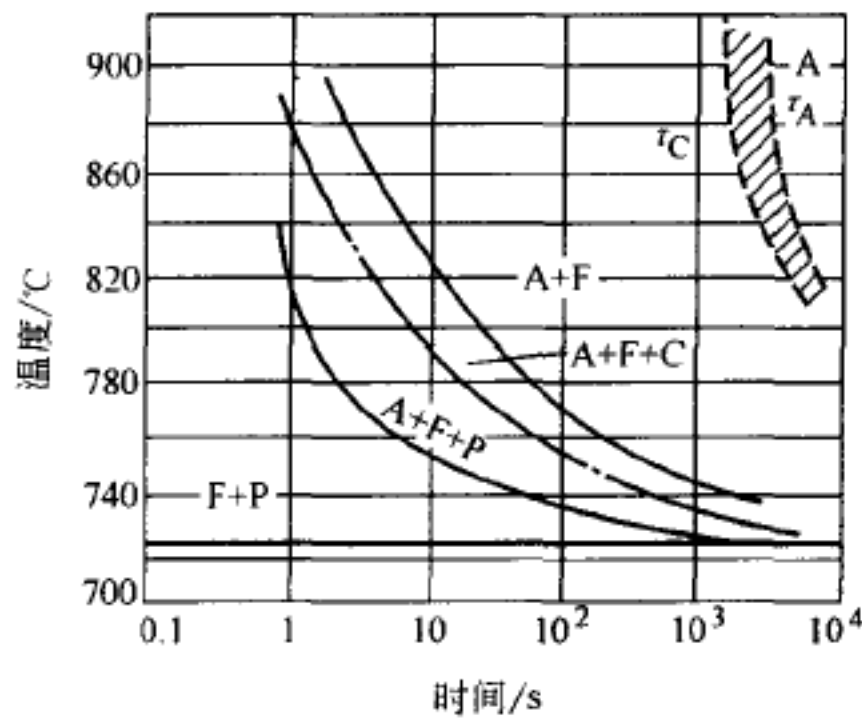


图 2-21 $w_C = 0.7\%$ 钢加热
奥氏体等温形成图
 τ_C —残留渗碳体溶解终了线
 τ_A —奥氏体均匀化完成线

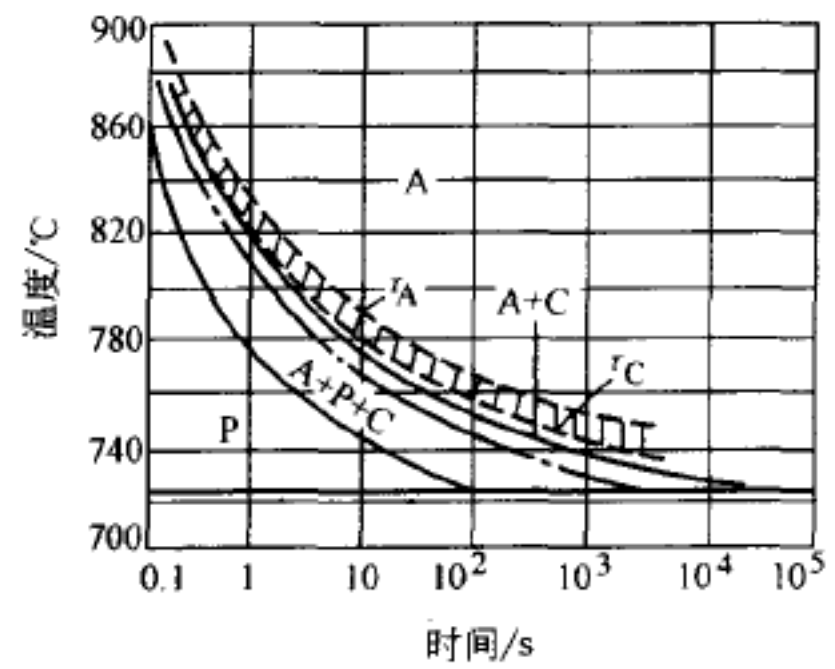


图 2-22 $w_C = 0.83\%$ 钢加热
奥氏体等温形成图
 τ_C —残留渗碳体溶解终了线
 τ_A —奥氏体均匀化完成线

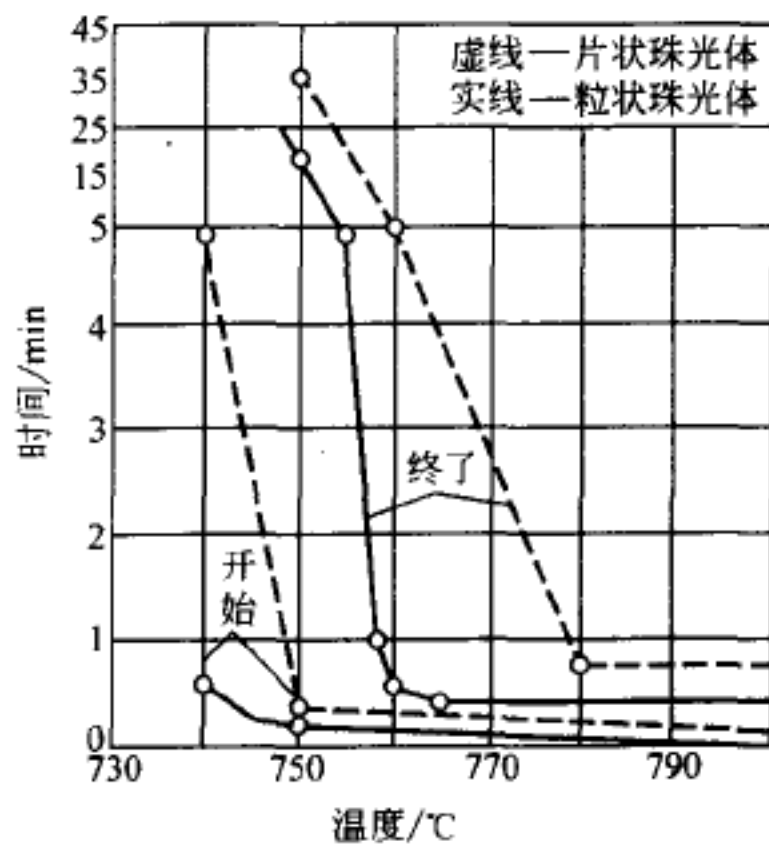


图 2-23 原始组织对 $w_C = 0.9\%$
钢奥氏体等温形成时间的影响

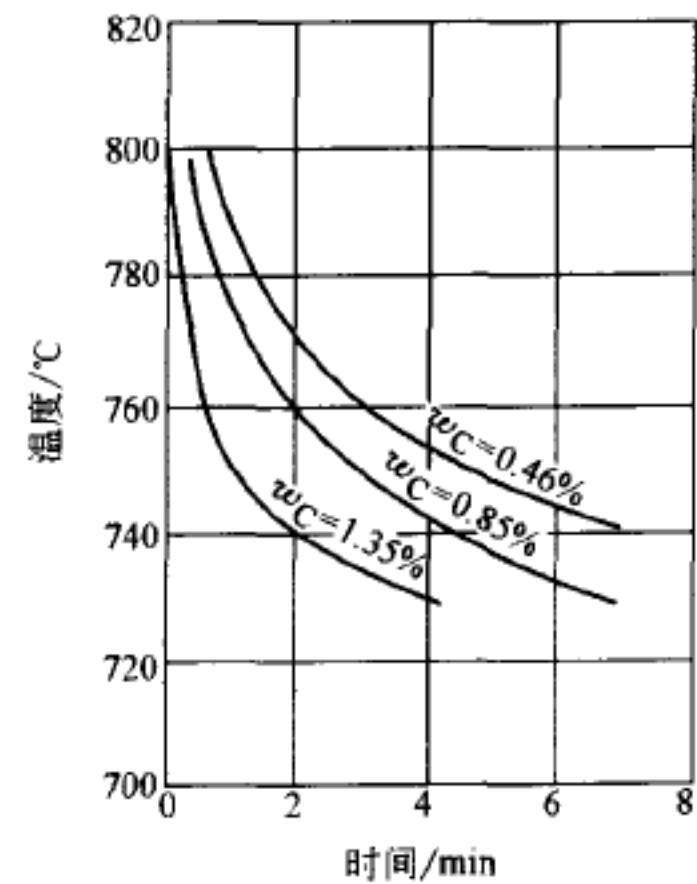


图 2-24 钢中碳含量对珠光体-
奥氏体等温转变 50% (体积分数)
时间的影响

表 2-16 加热温度对奥氏体等温形成速度的影响

加热温度/°C	过热度 /°C	形核率 $N^{①}/\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	晶核成长速度/ $\text{mm} \cdot \text{s}$	转变 50% (体积分数) 的时间/s
740	17	2300	0.001	100
760	37	11000	0.010	9
780	57	52000	0.025	3
800	77	60000	0.040	1

① N 为晶核数。

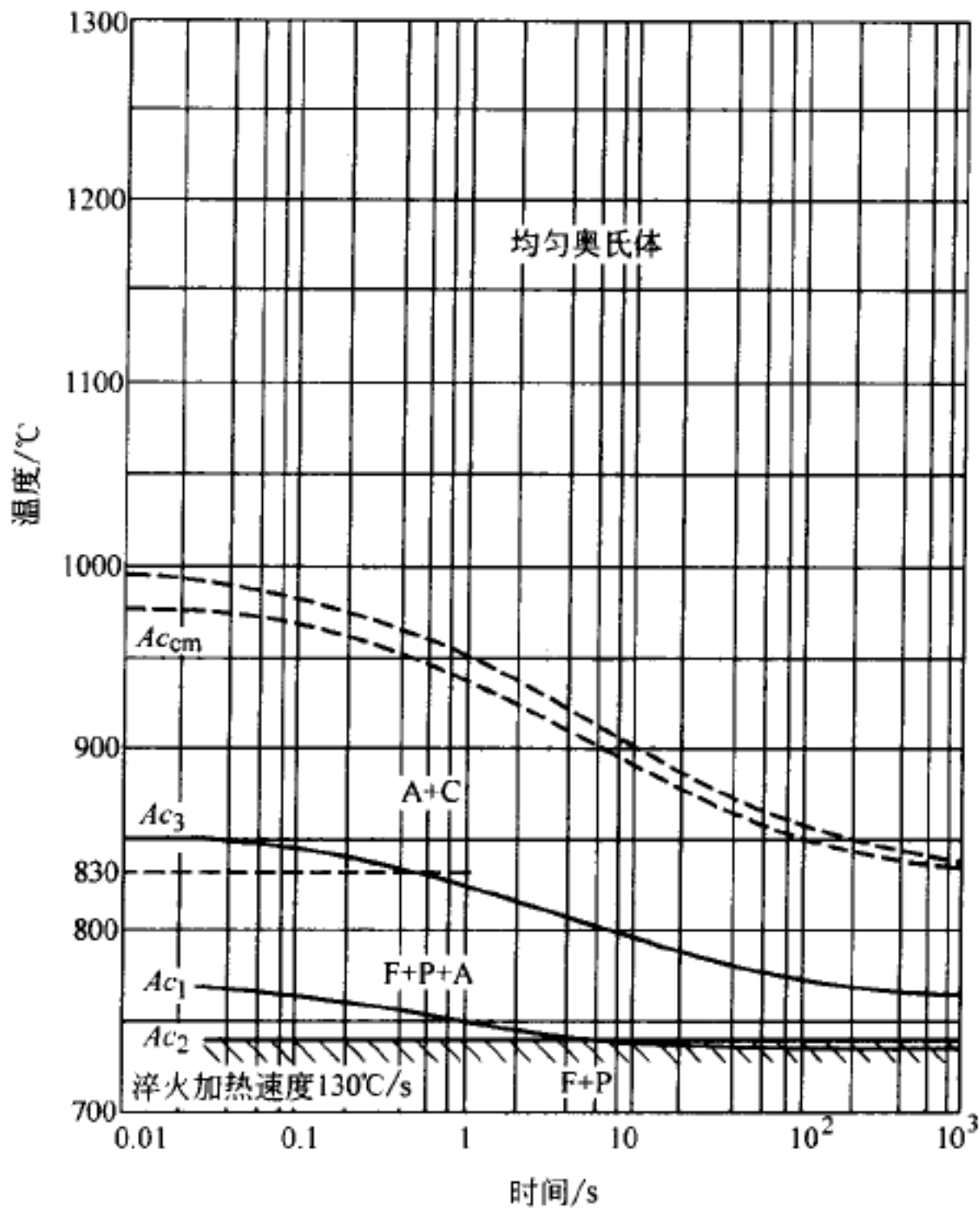
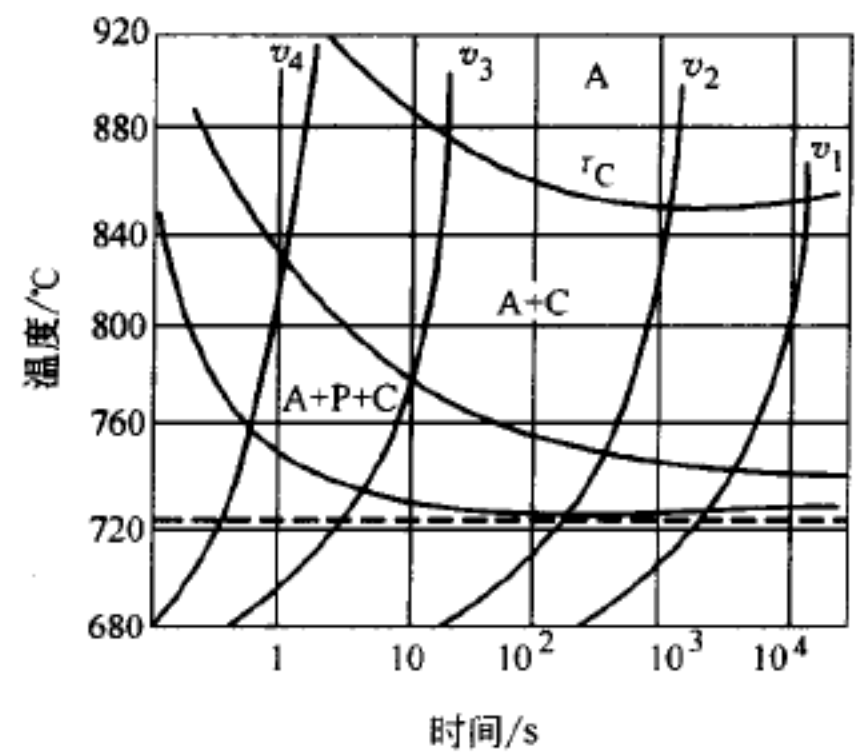
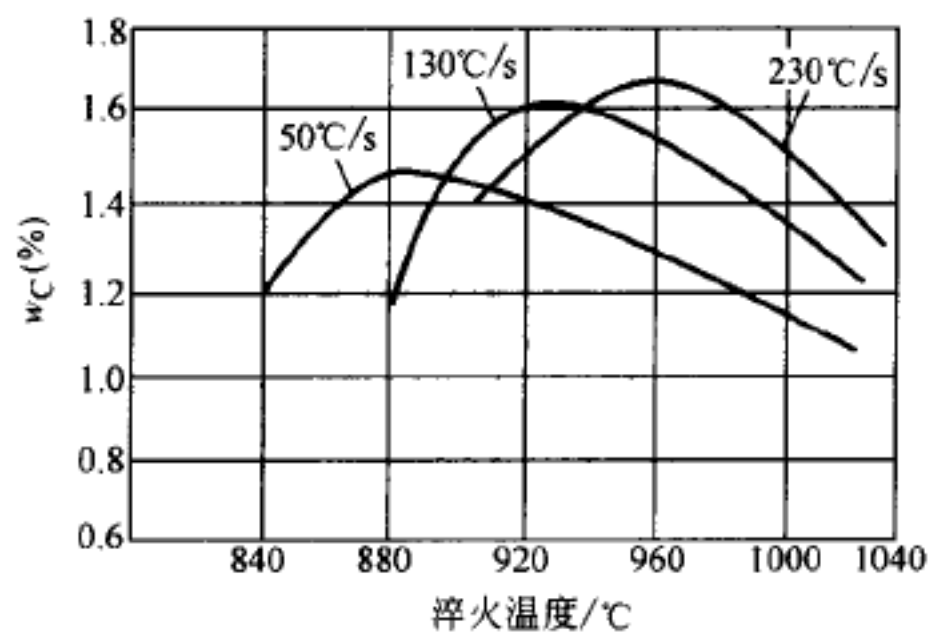
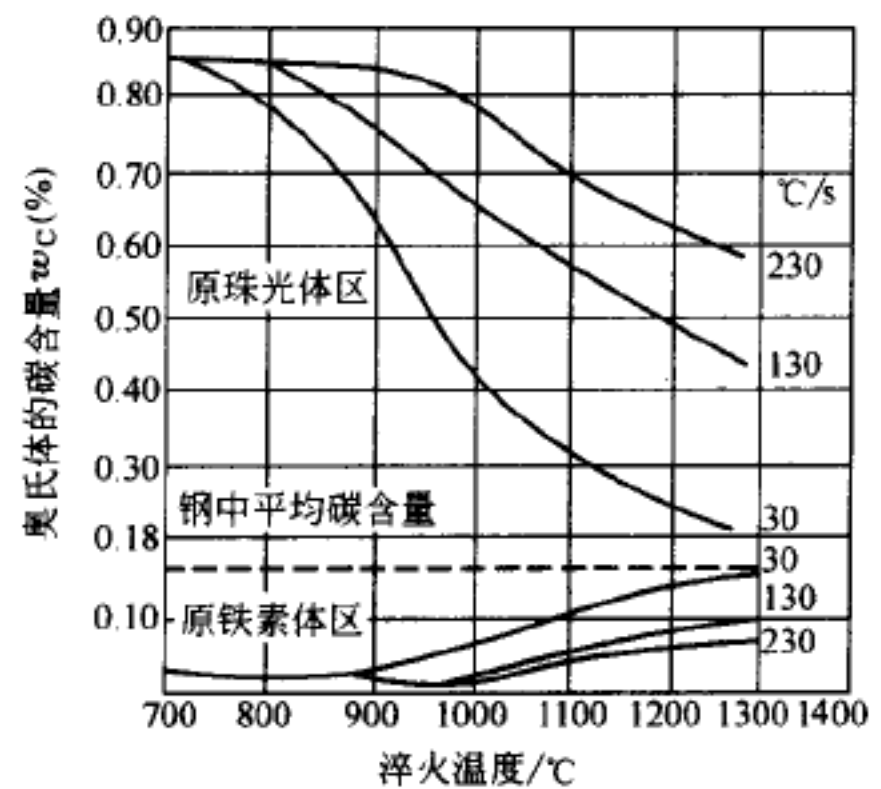


图 2-25 DIN50CrV4 钢的加热等温转变

图 2-26 共析钢连续加热时的奥氏体形成图
(加热速度 $v_1 < v_2 < v_3 < v_4$)图 2-27 加热速度和温度对 $w_c = 0.4\%$ 钢奥氏体中高碳区最高碳含量的影响图 2-28 加热速度和温度对 $w_c = 0.18\%$ 钢奥氏体碳含量不均匀度的影响

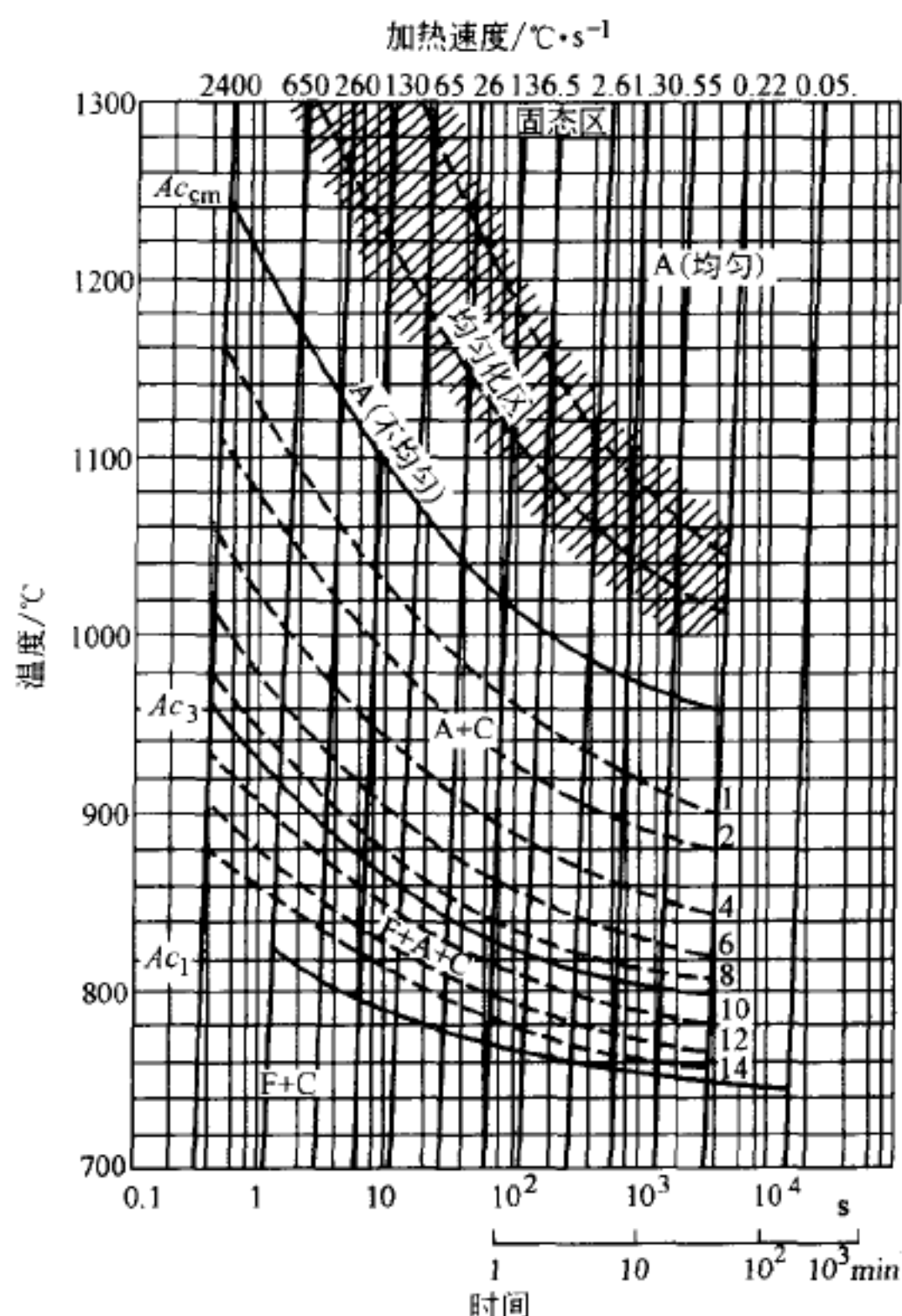


图 2-29 $w_C = 1.0\%$ 、 $w_{Cr} = 1.0\%$ Cr 钢加热时珠光体—碳化物组织转变为奥氏体的热力学曲线

Ac_1 — $\alpha \rightarrow \gamma$ 开始转变 Ac_3 — $\alpha \rightarrow \gamma$ 转变终止
 Acc_m —碳化物溶解终止，曲线上的数字表示未溶于奥氏体的碳化物数量

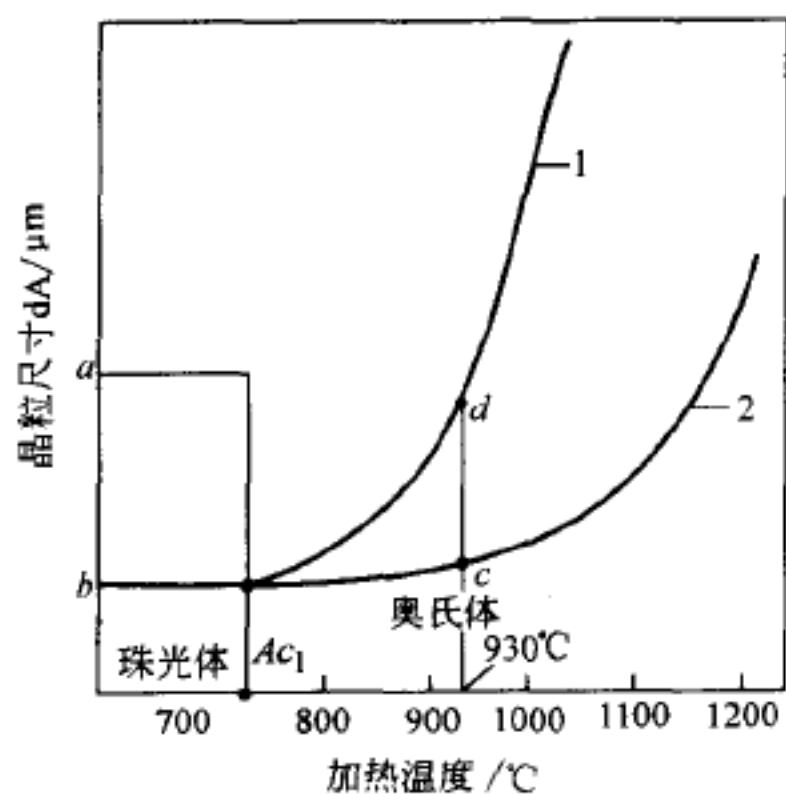


图 2-31 钢的晶粒长大与加热温度关系
 曲线 1 为本质粗晶粒钢 曲线 2 为本质细晶粒钢
 a—原奥氏体晶粒 b—奥氏体初始晶粒
 c, d—在正常工艺试验中得到的晶粒尺寸

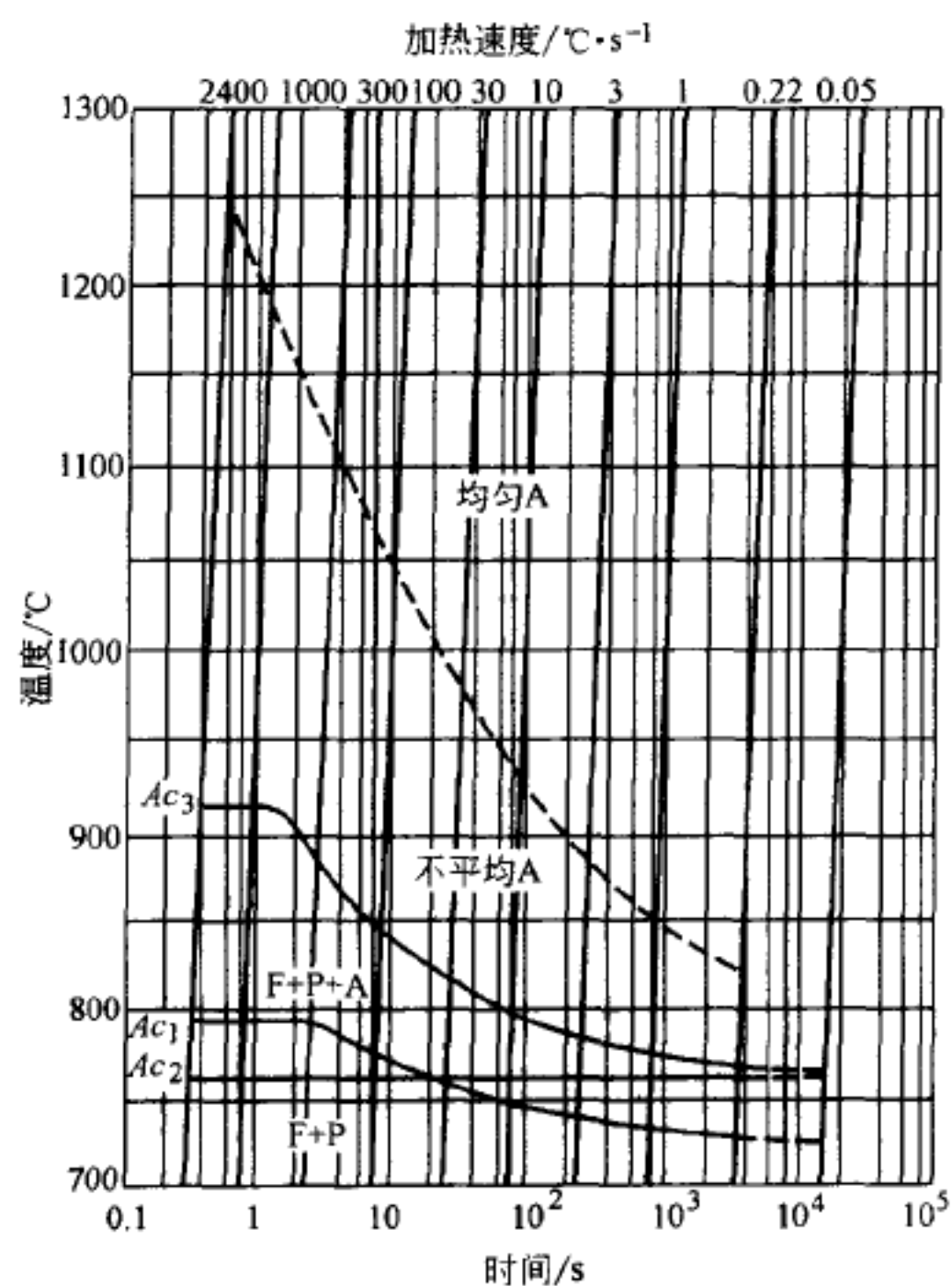


图 2-30 DIN Ck45 钢 (质量分数, %: C0.49、Si0.26、Mn0.74) 钢连续加热奥氏体化 时间-温度曲线

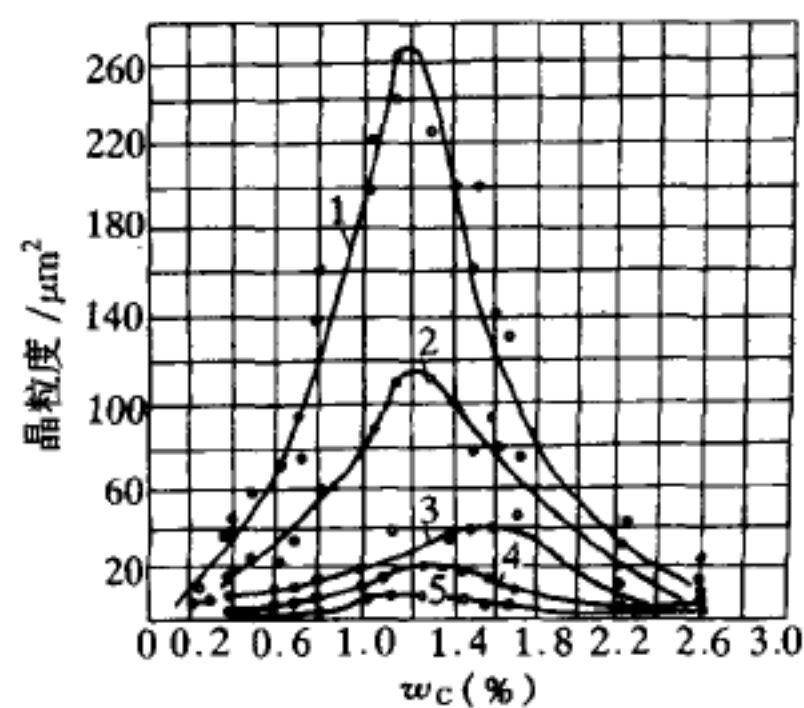


图 2-32 碳含量对奥氏体晶粒长大趋向的影响 (在各温度保持 3h)

1—1300°C 2—1200°C
 3—1100°C 4—1000°C
 5—900°C

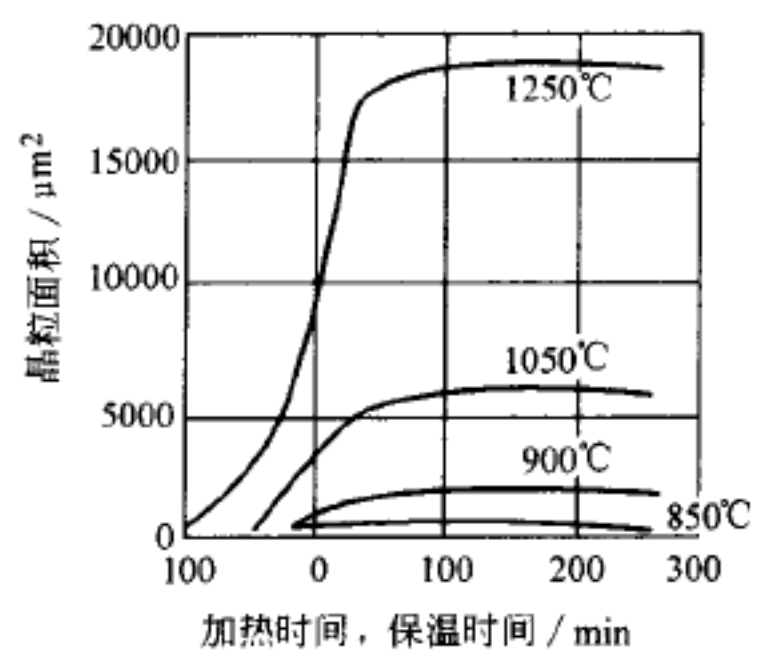


图 2-33 $w_{\text{C}} = 0.48\%$, $w_{\text{Mn}} = 0.82\%$
钢奥氏体晶粒尺寸与加热温度
及保持时间的关系

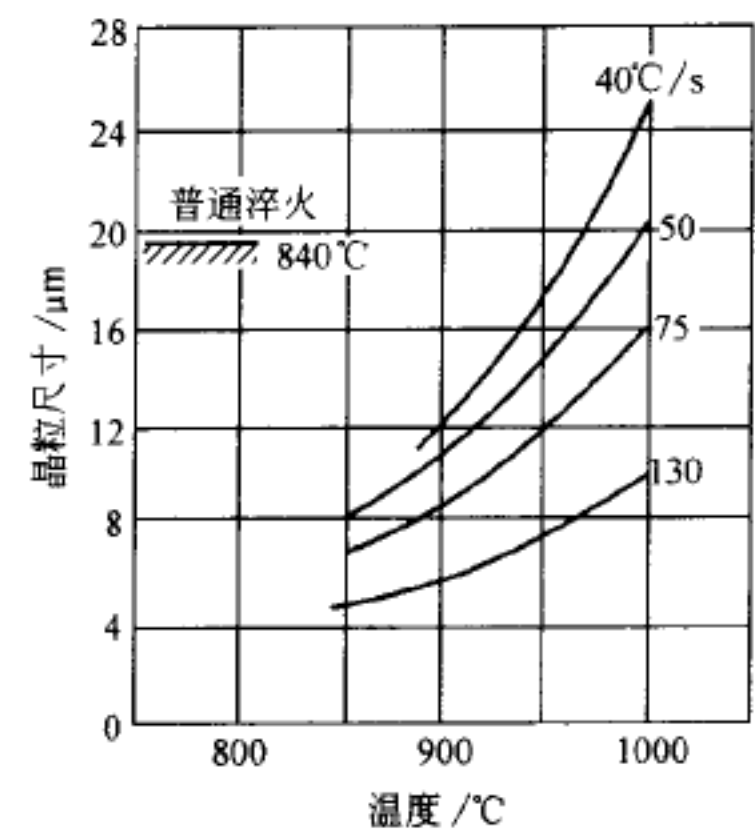


图 2-34 45 钢在不同加热温度下
奥氏体晶粒尺寸与加热温度的关系

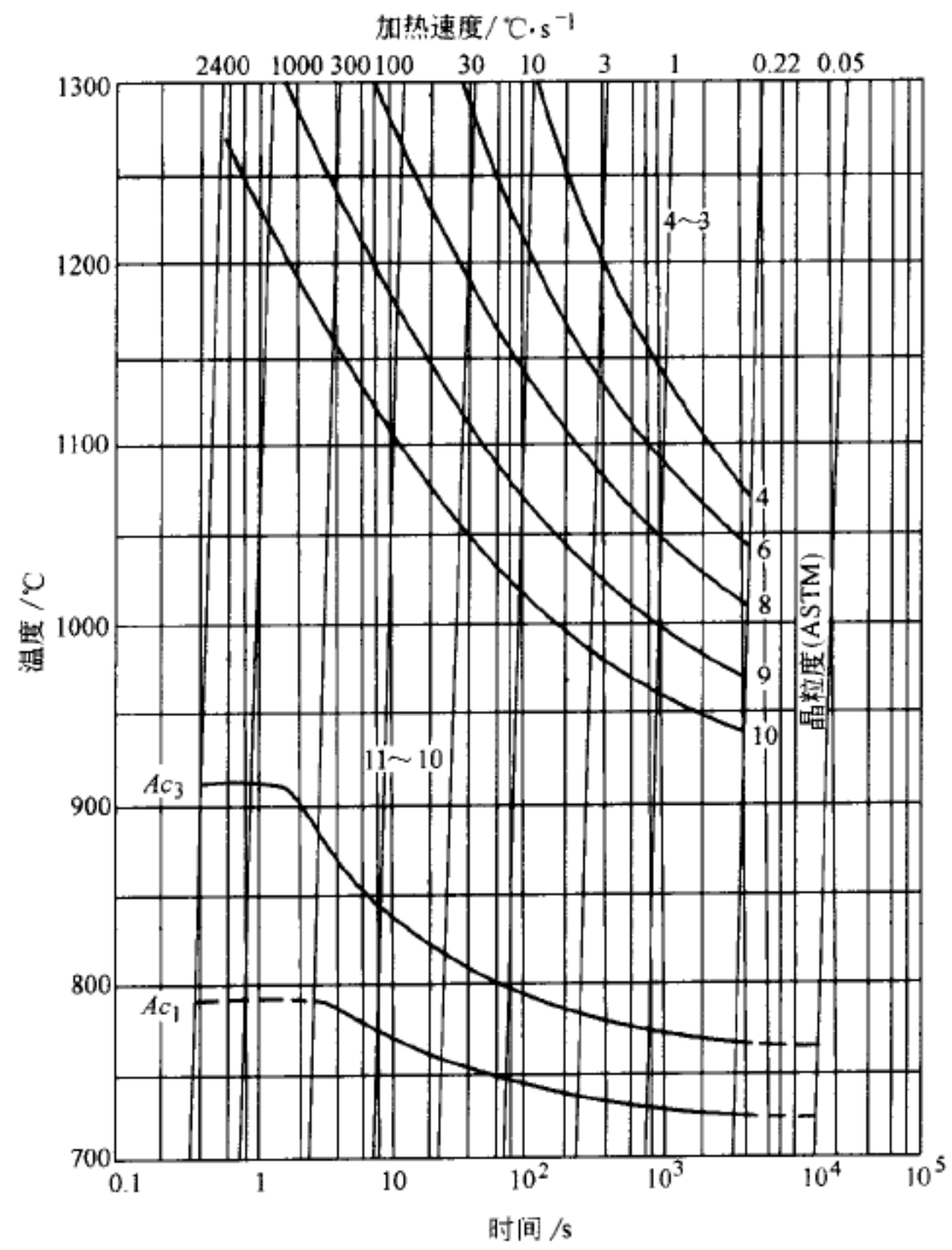


图 2-35 DIN ck45 钢在不同加热速度下的奥氏体晶粒度

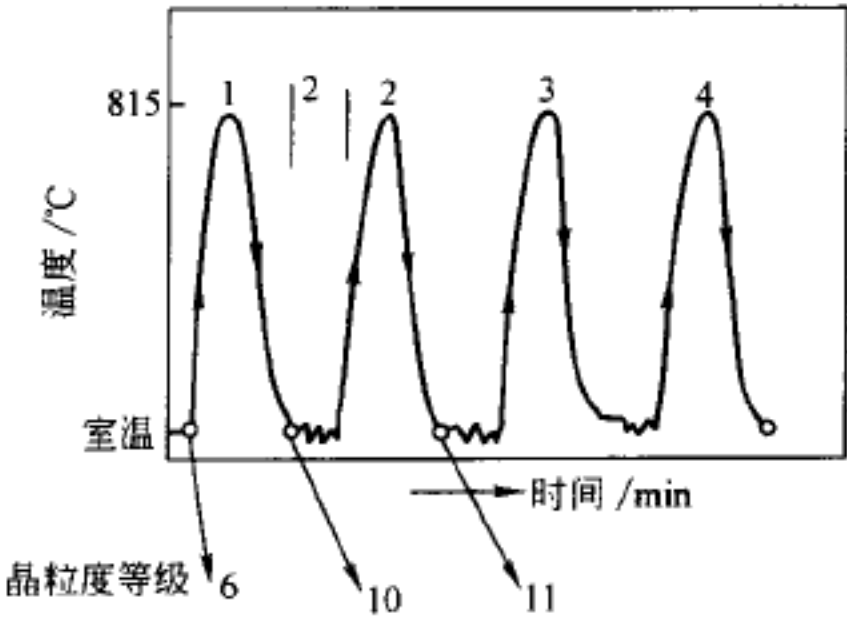


图 2-36 45 钢快速加热循环热处理工艺举例及细化晶粒效果

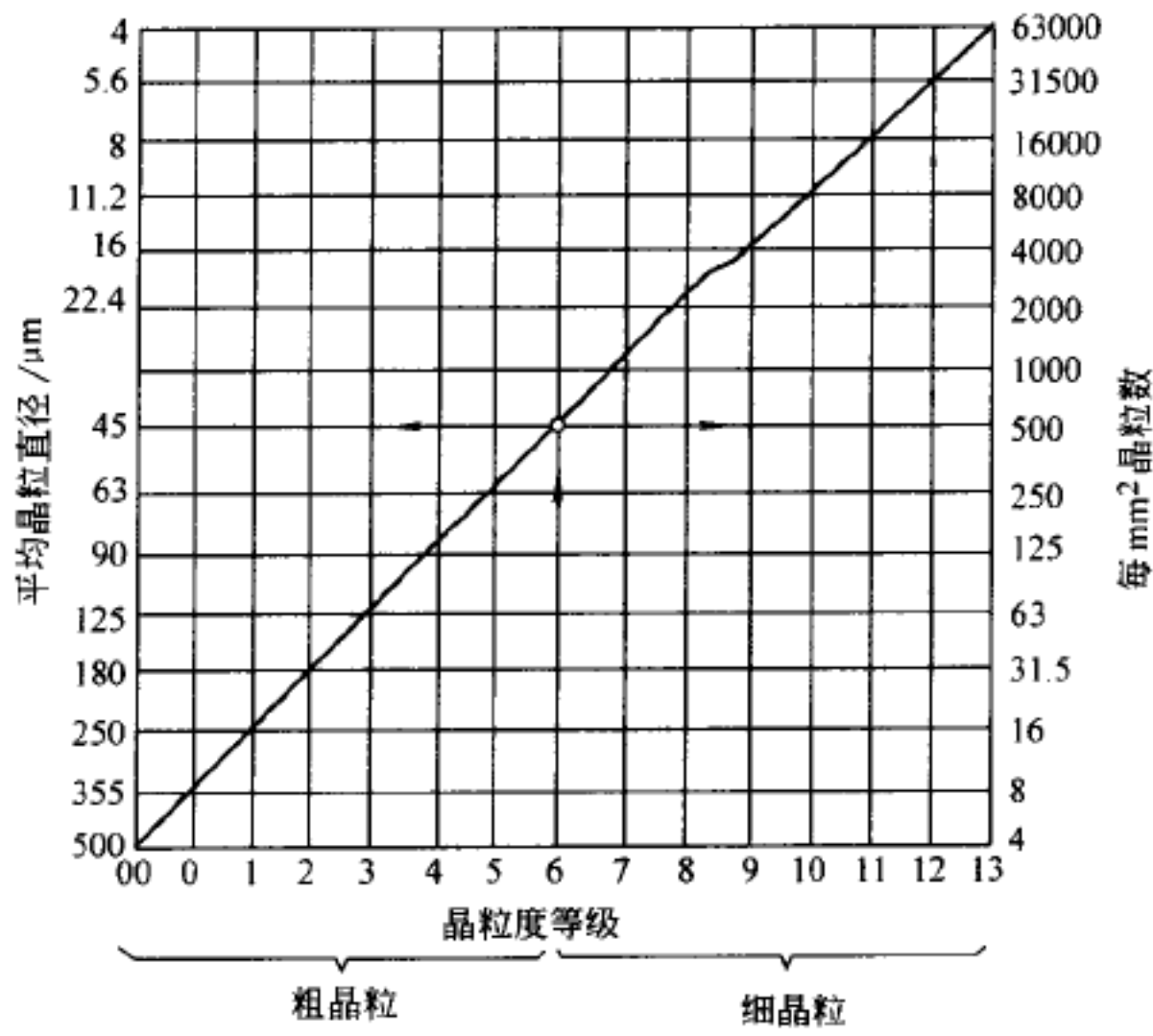


图 2-37 测定晶粒尺寸图

表 2-17 各晶粒度等级单位面积晶粒数和实际晶粒面积

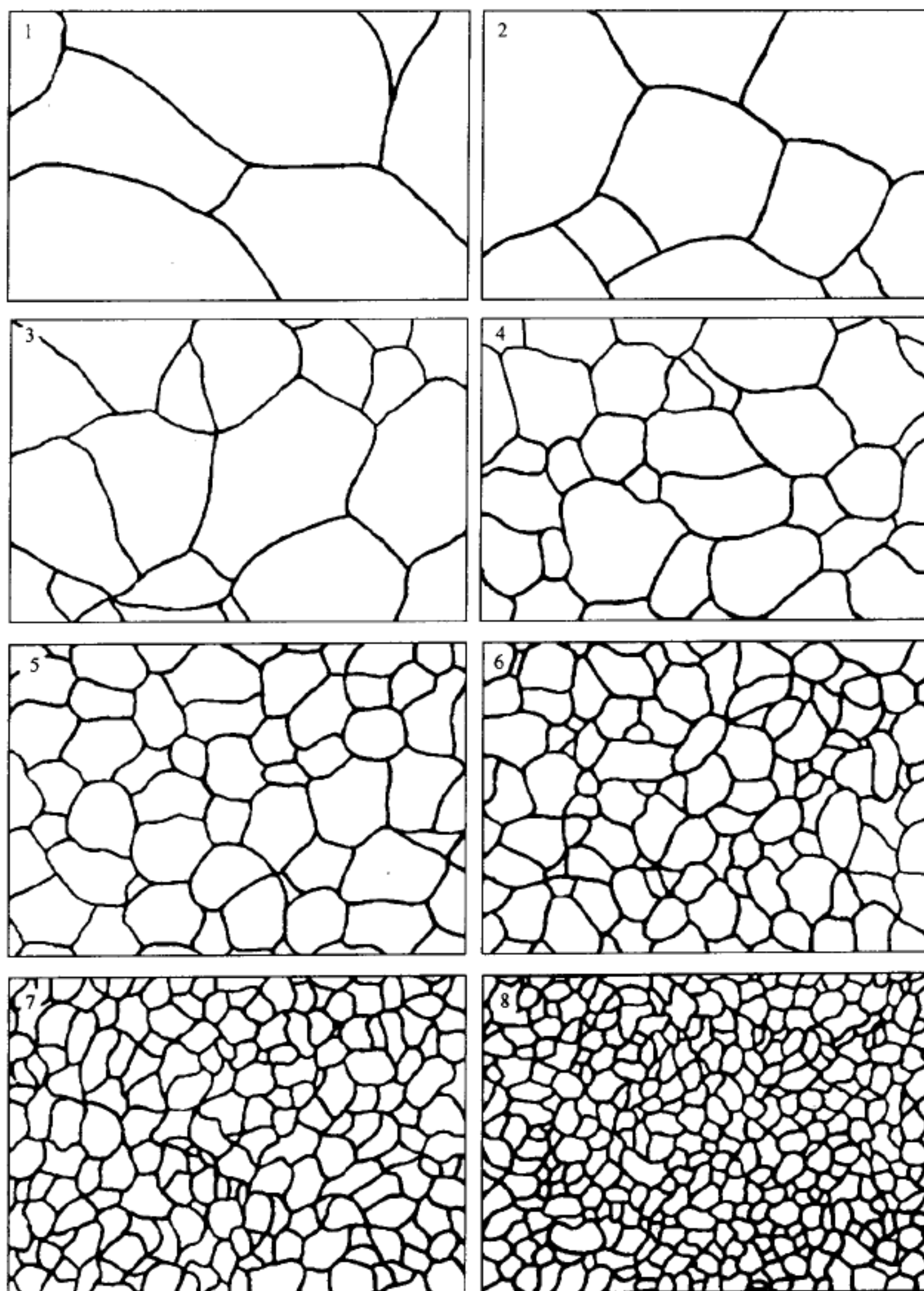
晶粒等级	放大 100 倍视场每 1dm ² 面积的晶粒数		实际晶数面积/μm ²	
	平 均	波动范围	平 均	波动范围
1	1	0.75 ~ 1.5	64000	40000 ~ 80000
2	2	1.5 ~ 3.0	32000	20000 ~ 40000
3	4	3.0 ~ 6.0	16000	10000 ~ 20000
4	8	6.0 ~ 12.0	8000	5000 ~ 10000
5	16	12.0 ~ 24.0	4000	2500 ~ 5000
6	32	24.0 ~ 48.0	2000	1250 ~ 2500
7	64	48.0 ~ 96.0	1000	625 ~ 1250
8	128	96.0 ~ 192.0	500	313 ~ 625

表 2-18 ASTM 晶粒尺寸

ASTM 晶粒号	每 mm ² 晶粒数	晶粒平均面积/mm ²	晶粒平均直径/mm
-3	1	1	1.130
-2	2	0.5	0.800
-1	4	0.25	0.564
0	8	0.125	0.396
1	16	0.062	0.280
2	32	0.031	0.200
3	64	0.0156	0.140
4	128	0.0078	0.100

(续)

ASTM 晶粒号	每 mm ² 晶粒数	晶粒平均面积/mm ²	晶粒平均直径/mm
5	256	0.0039	0.070
6	512	0.00195	0.050
7	1024	0.00098	0.034
8	2048	0.00049	0.024
9	4096	0.000244	0.0196
10	8200	0.000122	0.0124
11	16400	0.000061	0.0088
12	32800	0.000030	0.0062

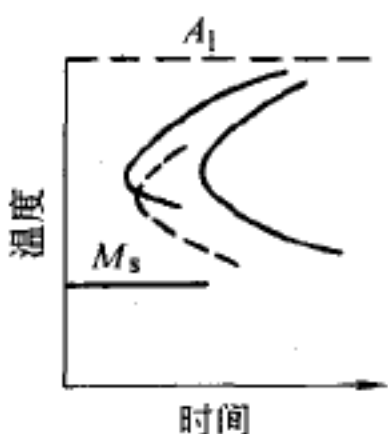
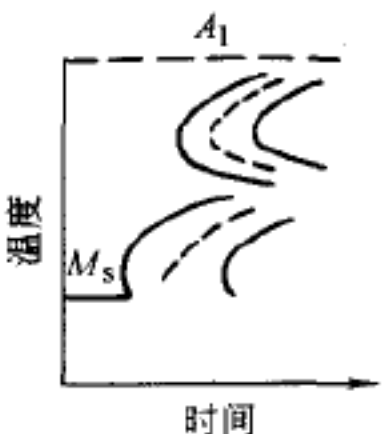
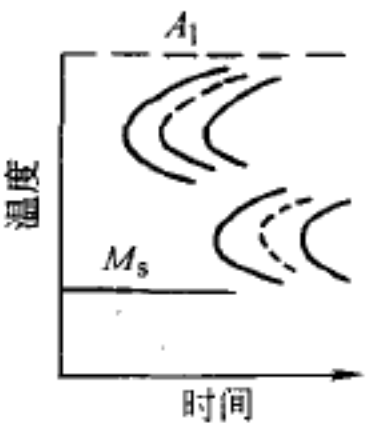
图 2-38 晶粒度等级图 (数字表示晶粒度级别) $\times 100$

2.6 钢的过冷奥氏体等温转变和连续冷却转变类型（表 2-19 ~ 表 2-22）

表 2-19 过冷奥氏体转变类型及主要特征

主要特征	珠光体转变	贝氏体转变	马氏体转变
扩散性	有 Fe、C 及合金元素的原子扩散	有 C 原子扩散，无 Fe 及合金元素的原子扩散	无扩散
共格性	无共格性	有共格性，表面有浮凸	有共格性，表面有浮凸
生核性及领先相	生核长大，领先相为渗碳体	生核长大，领先相为 α 相	生核长大
形成组织	两相组织（ α 相 + 渗碳体）： 珠光体（P） 索氏体（S） 托氏体（T）	两相组织： 上贝氏体（ α 相 + 渗碳体， $B_{\text{上}}$ ） 下贝氏体（ α 相 + ϵ 渗碳体， $B_{\text{下}}$ ） 粒状贝氏体（ α 相 + 渗碳体， $B_{\text{粒}}$ ）	单相组织： 马氏体（M）
备注	亚（过）共析钢在珠光体转变前还形成先共析铁素体（渗碳体）	上贝氏体转变不能进行到底，继而发生二次珠光体转变	$w_{\text{C}} > 0.4\%$ 的钢中存在未转变的残留奥氏体

表 2-20 奥氏体等温转变图的主要类型

类 型			
化 学 成 分 及 代 表 钢 号	碳素钢属于此类。含有非形成碳化物元素，如硅、镍、铜、硼等的低合金钢。65Mn，40Ni3，60Si	含有碳化物形成元素铬、钼、钨、钒等合金结构钢：18CrMn，20CrMo，35CrMo，35CrSi	含有碳化物形成元素铬、钼、钨、钒等的高合金钢：9CrSi，W18Cr4V
形 成 原 因 及 特 征	珠光体型和贝氏体型转变在相近的温区发生。马氏体点以上只出现一个转变速度的极大值，在亚（过）共析钢的奥氏体分解时转变图上有一条先共析铁素体（渗碳体）的析出线	由于钢中存在形成碳化物元素，一方面增加过冷奥氏体的稳定性，同时使转变曲线出现双 C 型特征 在含碳量较低，且含有形成碳化物合金元素的合金结构钢中出现	由于钢中有形成碳化物元素，一方面增加过冷奥氏体的稳定性，同时使转变曲线出现双 C 型特征 在含碳量较高，且含有形成碳化物合金元素的钢中出现 奥氏体到贝氏体转变时间较长

(续)

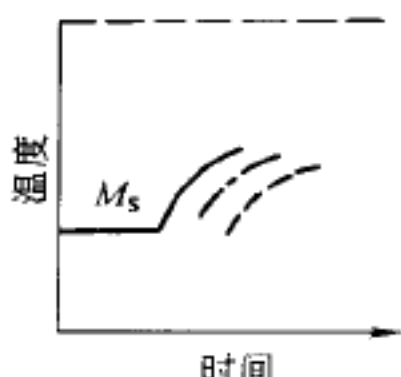
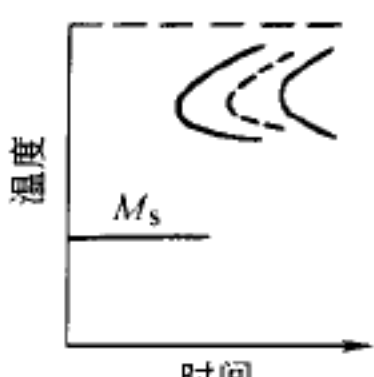
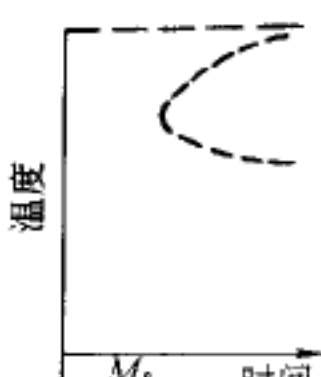
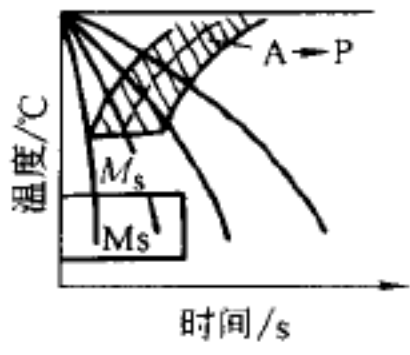
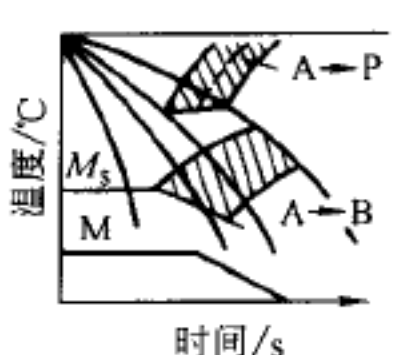
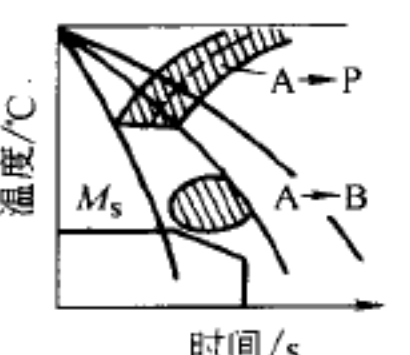
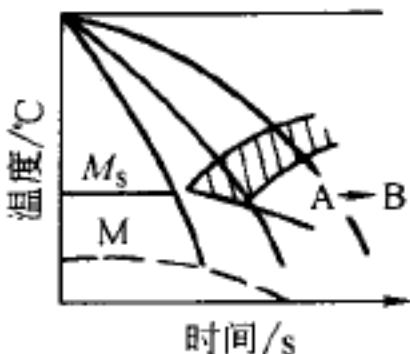
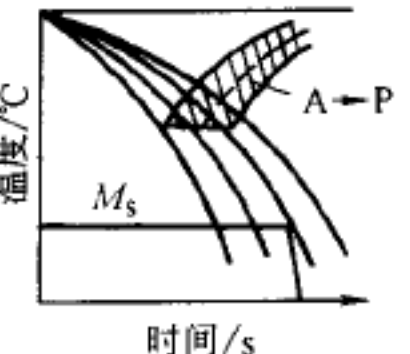
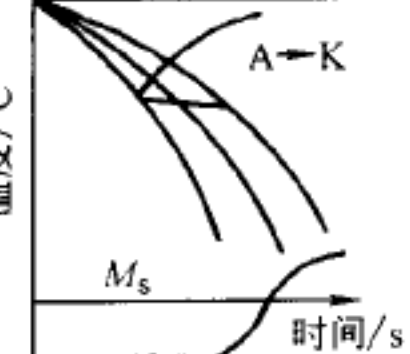
类 型			
化 学 成 分 及 代 表 钢 号	低碳 (w_c)、中碳和高含量的钼、钨、铬、镍、锰、钢, 如 18Cr2Ni4WA, 18Cr2Ni4MoA, 25Cr2Ni4WA, 35Cr2Ni4MoA	中碳高铬钢及高碳高铬钢, 如 3Cr13, 4Cr13, 3Cr13Si	有碳化物析出倾向的奥氏体钢, 如 4Cr14NiW2Mo
形 成 原 因 及 特 征	由于含有钼、钨、铬、镍等元素, 强烈地提高了过冷奥氏体的稳定性, 使珠光体转变曲线显著地右移。又因碳含量较低, 有利于生成贝氏体的 α -相晶核。因而, 贝氏体的转变曲线相对地左移	钢中碳含量和合金元素含量较高, 使贝氏体的长大速度显著降低, 推迟贝氏体的转变	钢的 M_s 点低于室温, 在马氏体点以上 A_1 之下不发生任何转变。仅在特殊试验测定时, 才能发现过剩碳化物在高温析出

表 2-21 奥氏体连续冷却转变特点

特 点		说 明
共析碳钢	共析碳钢连续冷却转变图形的特征	只有 C 型曲线的上半部分, 而无中温区的贝氏体转变。因为贝氏体转变的孕育期较长, 珠光体转变最不稳定区的孕育期相当短, 连续冷却时奥氏体大部分在高温转变为珠光体 在亚共析钢连续冷却时可以发生贝氏体转变
	共析碳钢连续冷却转变的时间和连续冷却转变图的位置	连续冷却转变较之等温转变转变温度较低, 孕育期和一定量的转变时间更长些。连续冷却转变曲线在 C 型等温转变曲线的右下方
合金钢	合金钢连续冷却转变图形的特征	不论珠光体转变区或贝氏体转变区多半只有 C 型曲线的上半部分 是否存在珠光体型的转变或贝氏体型的转变, 以及它们的相对位置, 决定于合金元素的种类和含量
	合金钢连续冷却转变图的位置	连续冷却转变曲线在等温转变 C 型曲线的右下方
相变温度特征		相变是在一定温度范围发生
形核长大特征		降温过程中零碎积累形核长大 (马氏体相变除外)。冷却时奥氏体经过高温区 (珠光体区域上部) 势能较小, 因而转变孕育期较等温转变的为长
连续冷却转变所生成的组织		有单一的, 而在较大截面零件淬火过渡区多半生成混合组织 由于在连续冷却过程中可能发生相变, 改变了奥氏体中的成分, 因而改变了马氏体转变点, 如果, 在冷却过程中有共析前的铁素体析出或上贝氏体形成, 将使组织中残留奥氏体量增多

表 2-22 奥氏体连续冷却转变图的主要类型

类 型			
转变曲线特征	只有珠光体转变区	有珠光体转变区，同时存在贝氏体转变区；两者相分离，贝氏体转变区超前（孕育期短些）于珠光体转变区	有珠光体转变区，同时存在贝氏体转变区，两者相分离；珠光体转变区超前（孕育期短些）于贝氏体转变区
代表性的成分或钢号	共析碳钢和过共析碳钢；当碳含量在中碳以下，可以存在贝氏体转变区	含碳较低的合金结构钢，例如 35CrMo、35CrSi、32CrMo 等	高碳的合金工具钢，例如 Cr12、Cr12Mo、4Cr5MoVSi
类 型			
转变曲线特征	只有贝氏体转变区	只有珠光体转变区	只有碳化物析出线，马氏体点 (M_s) 低于 0℃
代表性的成分或钢号	含有较高的 Cr、Ni 元素，特别是含有 Mo（或 W）元素的低碳和中碳合金结构钢，例如 18Cr2Ni4W、35CrNi4Mo 等	中碳高铬钢，例如 3Cr13、4Cr13（加热温度为 1200℃）	易形成碳化物的奥氏体钢，如 4Cr14Ni14W2Mo 钢

2.7 淬火钢在回火过程中的转变（表 2-23、表 2-24，图 2-39 ~ 图 2-45）

表 2-23 Fe-Fe₃C 合金淬火后回火时的组织转变

回 火 阶 段	回火温度 /℃	回 火 过 程 的 组 织 转 变	
		低碳板条马氏体	高碳片状马氏体
回火准备阶段 (碳原子偏聚)	25 ~ 100	C (N) 原子在位错线附近间隙位置偏聚 当 $w_C < 0.25\%$ 时，钢中不出现碳原子集群	碳原子集群化形成预脱溶原子团，进而形成长程有序化或调幅结构
回火第一阶段 (马氏体分解)	100 ~ 250	$w_C = 0.20\%$ 钢中碳原子继续偏聚而不析出	在约 100℃，马氏体内共格析出 ϵ 碳化物，马氏体基体中 $w_C = 0.20\% \sim 30\%$ 的上述组织被称为回火马氏体
回火第二阶段 (残留奥氏体分解)	200 ~ 300	$w_C < 0.40\%$ 的淬火钢中不出现残留奥氏体	$w_C > 0.40\%$ 的钢中残留奥氏体分解为下贝氏体

(续)

回火阶段	回火温度 /℃	回火过程的组织转变	
		低碳板条马氏体	高碳片状马氏体
回火第三阶段 (渗碳体形成)	250 ~ 400	在碳原子偏聚区直接形成 θ 碳化物	在 $(112)_M$, $(110)_M$ 晶面和马氏体晶界上析出片状 θ 碳化物 在约 400℃ 渗碳体聚合、长大和球状化, 但回火后的铁素体中仍保留马氏体晶体外形
回火第四阶段	400 ~ 600	位错胞和胞内位错线逐渐消失, 片状渗碳体球状化, 内应力消失, 显微组织仍保持原马氏体形貌	
	500 ~ 600	形成合金碳化物, 在含 Ti、Cr、Mo、V、Nb、W 钢中出现二次硬化, Fe_3C 有可能被溶解	
	600 ~ 700	α 相发生再结晶和晶粒长大, 球状 Fe_3C 长大, 中碳和高碳钢中的再结晶被抑制, 形成等轴铁素体	

表 2-24 合金元素对回火过程的影响

合金元素	化学符号	对淬火钢回火过程的影响
硅	Si	溶于 ϵ 碳化物, 提高其稳定性, 延长第一阶段时间, 提高第三个阶段温度
镍、钴、铝	Ni、Co、Al	此为碳化物形成元素, 对回火三阶段都有延缓作用, 铝显著抑制 $\epsilon \rightarrow \theta$ 碳化物转化
铬	Cr	既能形成合金碳化物, 又能溶于渗碳体, 推迟回火三个阶段, 提高马氏体回火抗力, $w_{Cr} = 12\%$ 钢在 450℃ 有二次硬化现象, Cr_7C_3 极易粗化
锰	Mn	大量溶于渗碳体, 降低 $\epsilon \rightarrow \theta$ 碳化物转化温度。其作用与铬、铝、硅相反
钼、钨、钒、钛、铌	Mo、W、V Ti、Nb	此为强烈碳化物形成元素, 不溶于渗碳体中, 高于 400℃ 分别形成稳定碳化物, 导致二次硬化。形成的典型碳化物为 Mo_2C 、 V_4C_3 、 W_2C 、 TiC 、 NbC 等

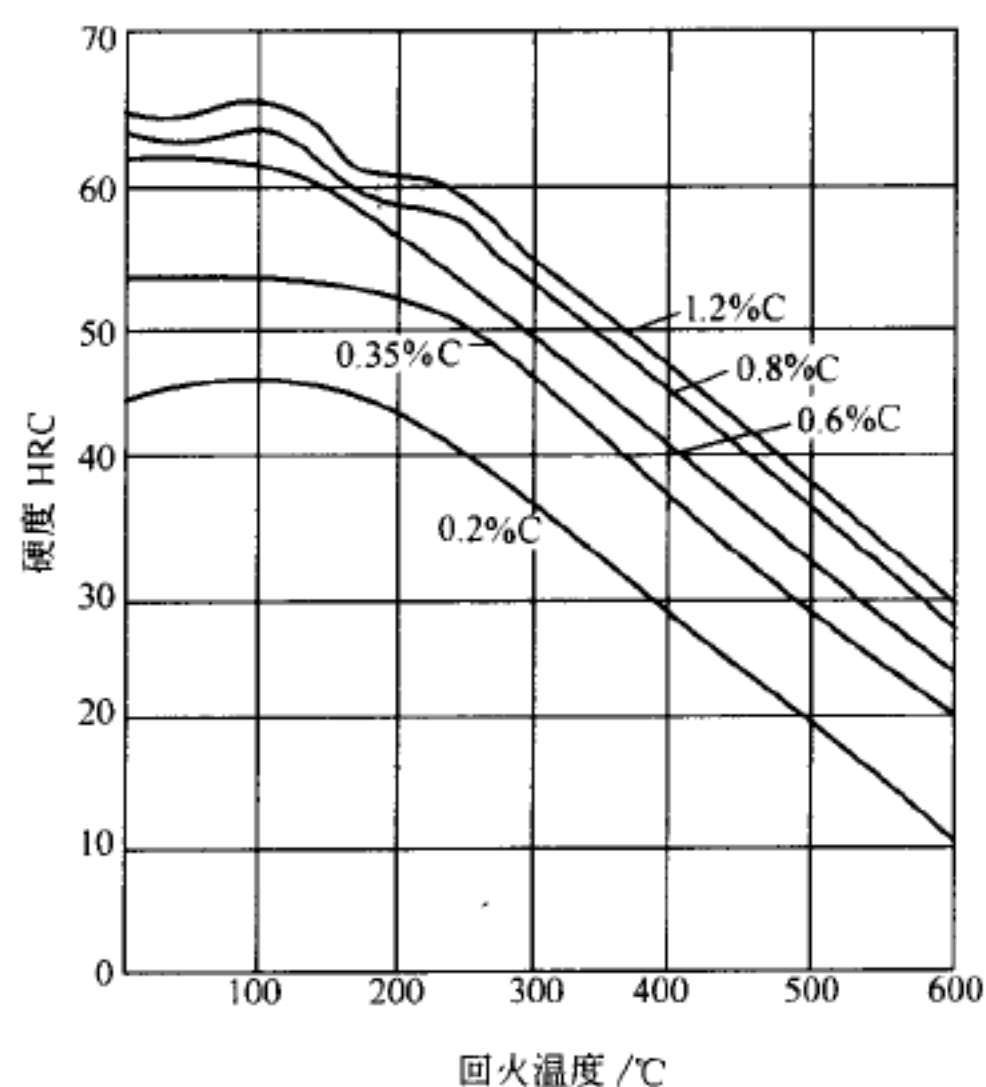


图 2-39 碳钢的回火硬度曲线

注: 图中碳元素含量为质量分数

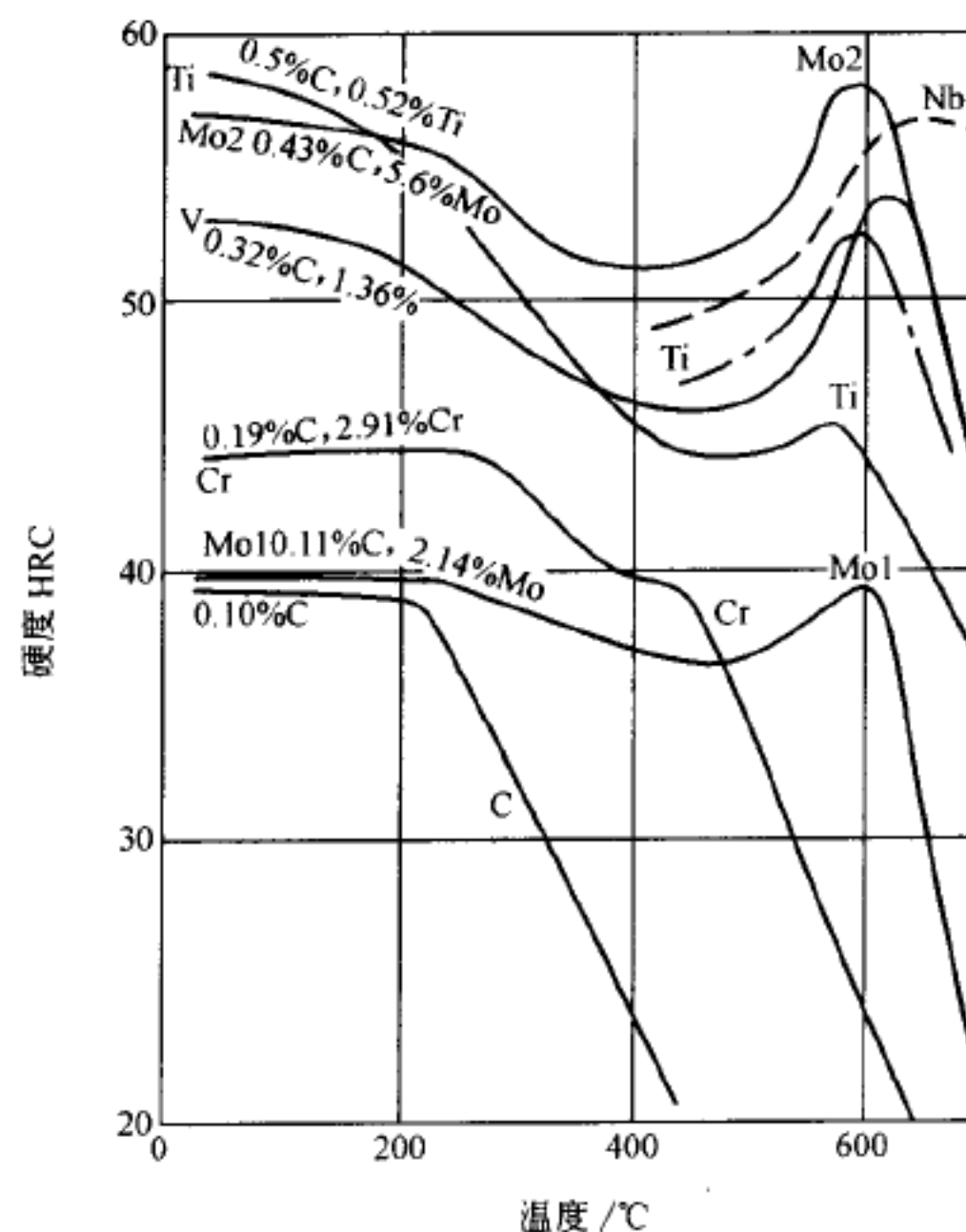


图 2-40 几种合金钢的回火硬度曲线

注: 图中各元素含量为质量分数

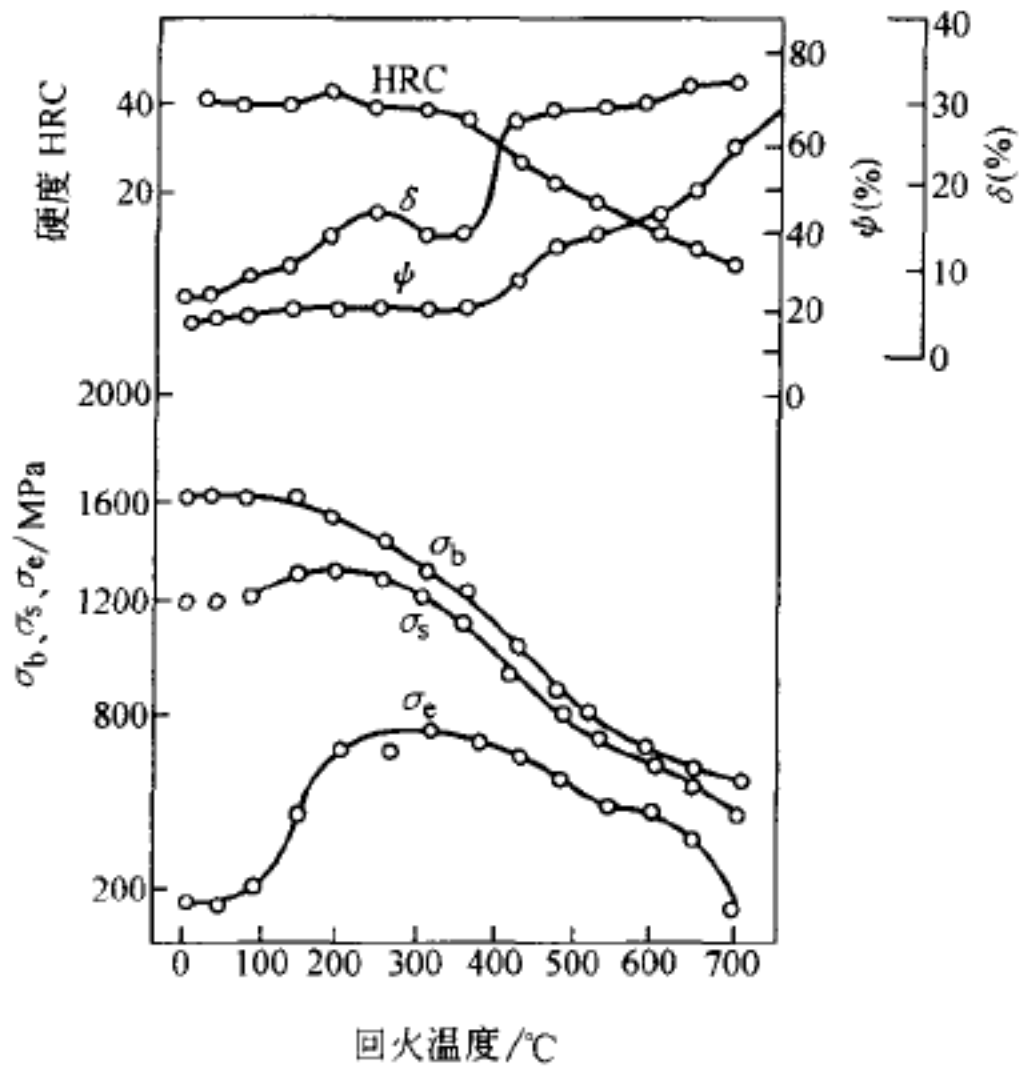


图 2-41 $w_c = 0.25\%$ 碳钢拉伸性能与回火温度的关系

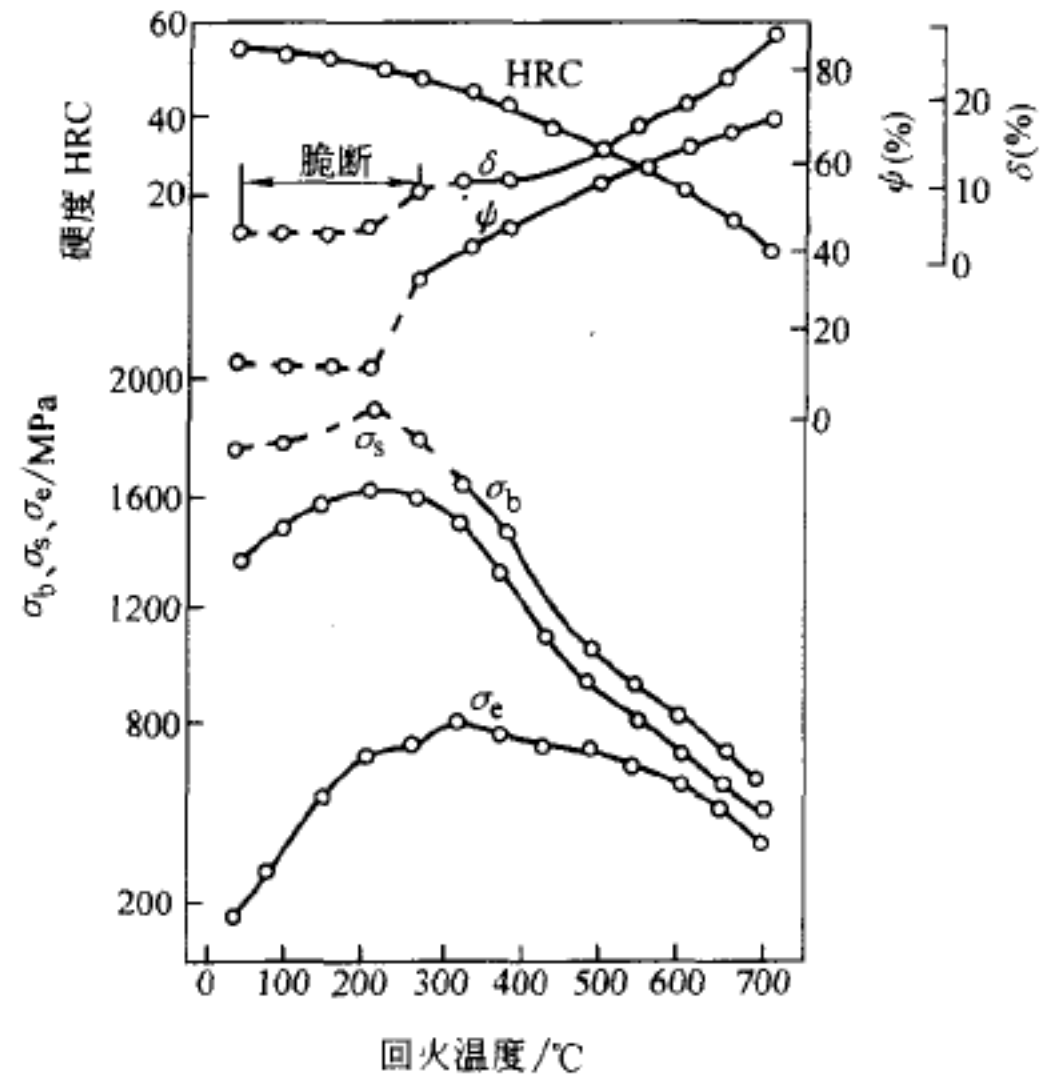
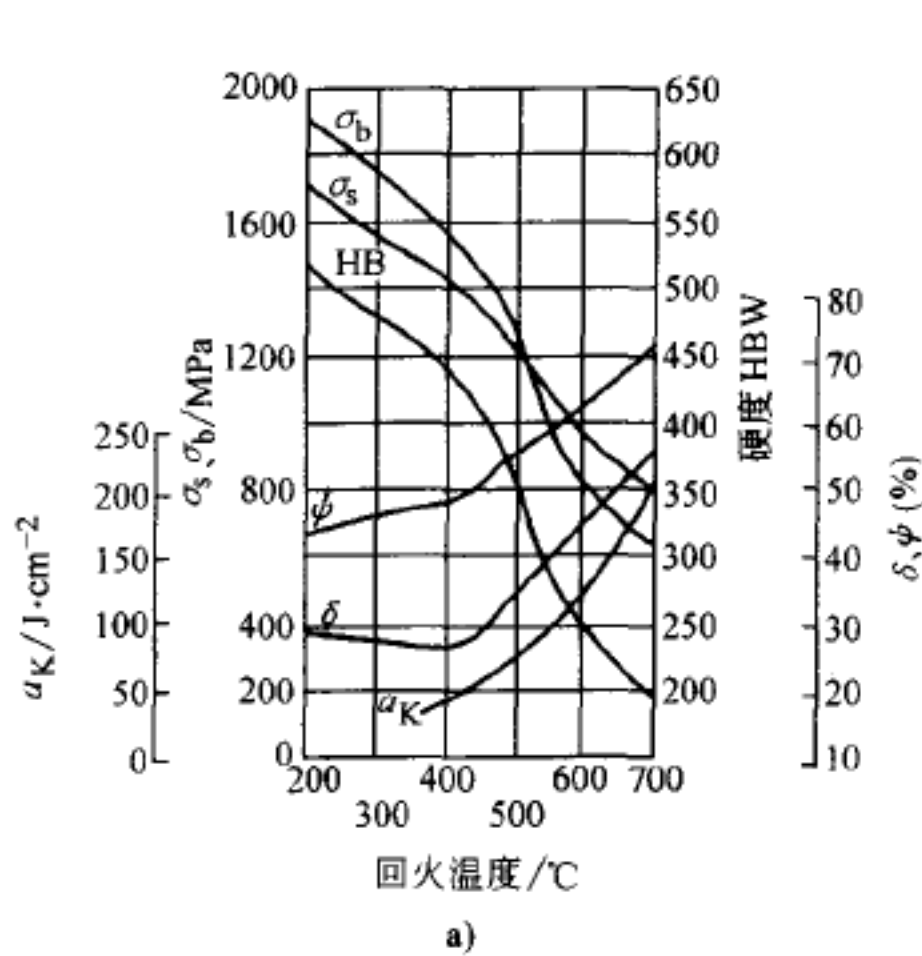
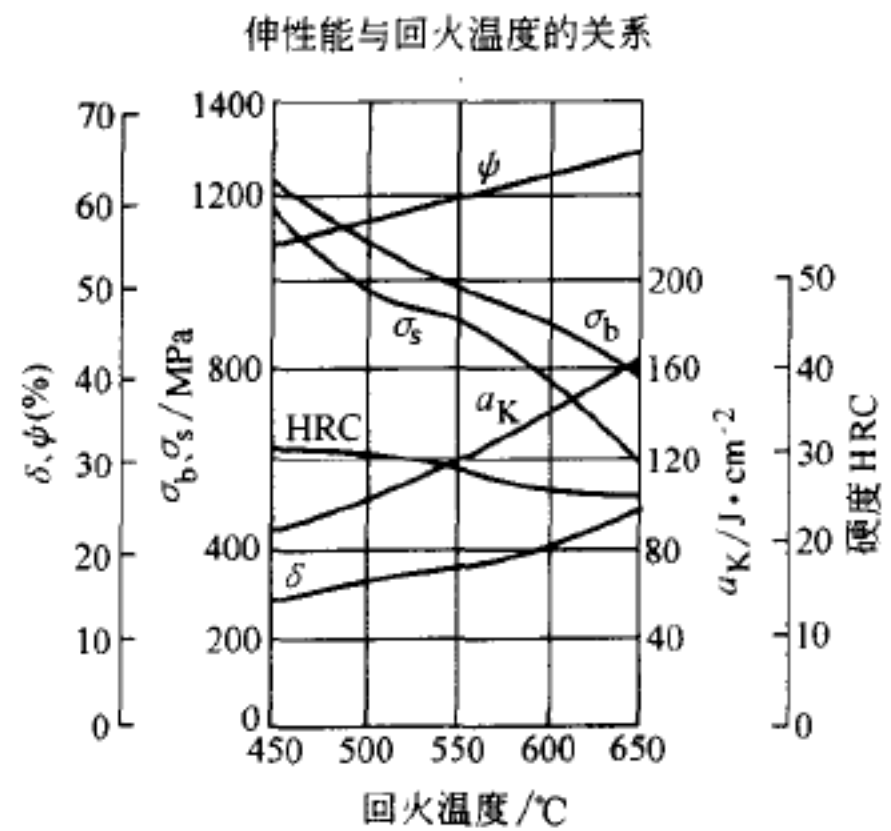


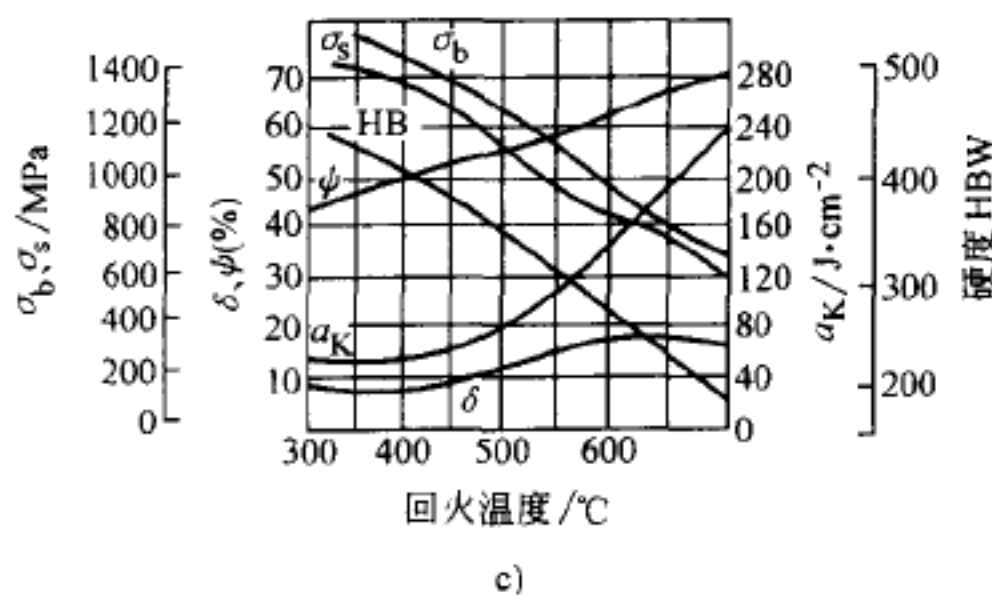
图 2-42 $w_c = 0.41\%$ 碳钢拉伸性能与回火温度关系



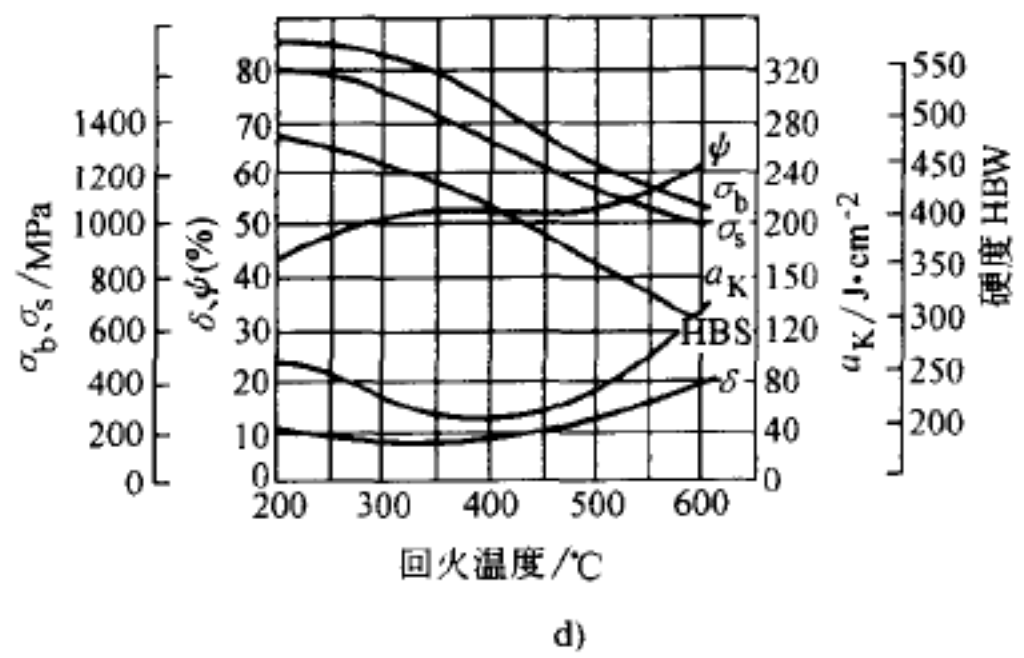
a)



b)



c)



d)

图 2-43 几种结构钢力学性能与回火温度的关系

a) 40Cr, 850 $^{\circ}\text{C}$ 油淬 b) 40MnB, 850 $^{\circ}\text{C}$ 油淬

c) 25CrMo, 880 $^{\circ}\text{C}$ 油淬 d) 30CrMnSi, 890 $^{\circ}\text{C}$ 油淬

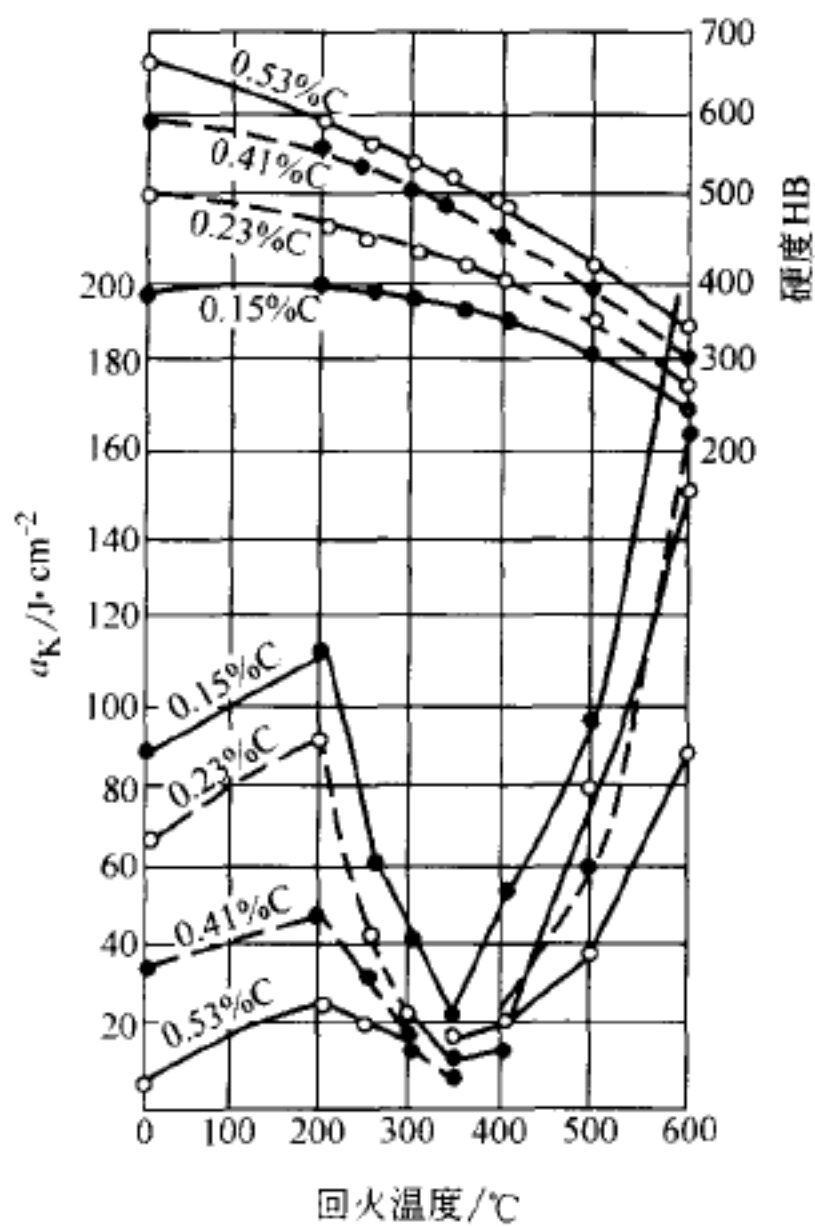


图 2-44 不同碳含量碳素钢的冲击韧度随回火温度的变化
(图中碳含量为质量分数)

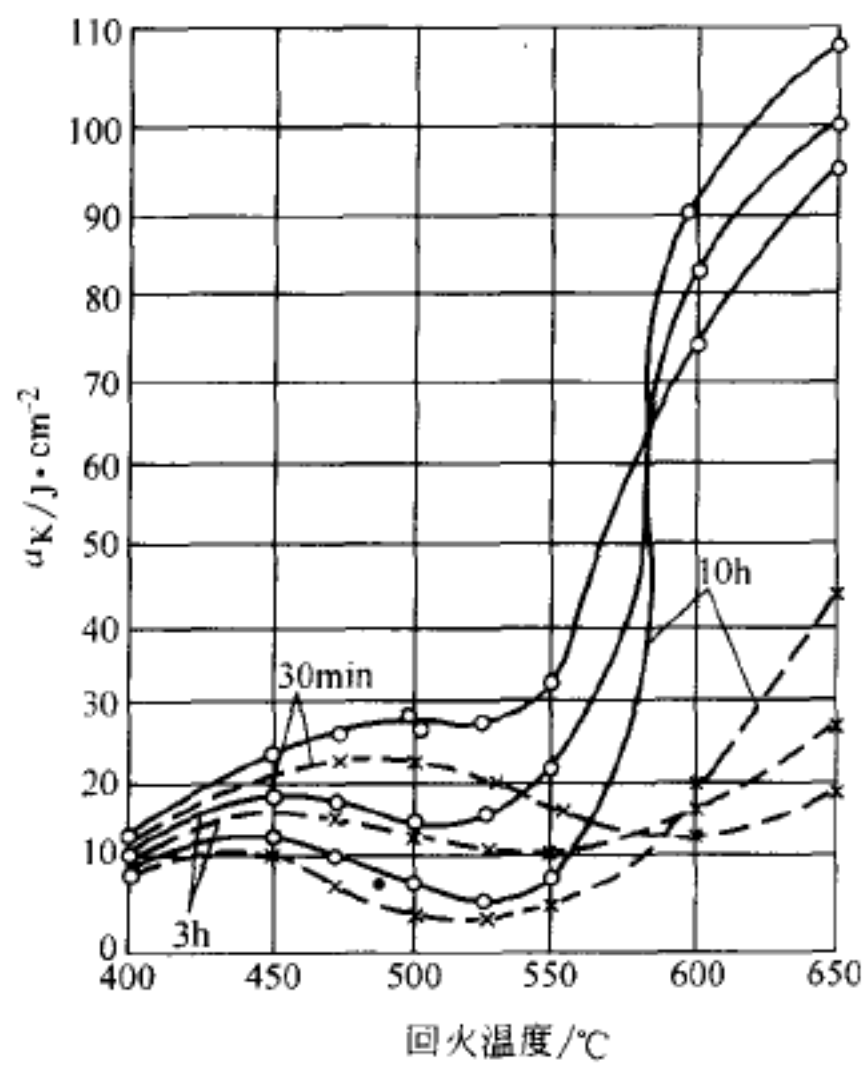


图 2-45 铬镍合金钢的冲击韧度随回火温度及回火后冷却速度的变化
(回火脆性的表现)
 $w_C = 0.35\%$, $w_{Mn} = 0.52\%$,
 $w_{Si} = 0.24\%$, $w_{Ni} = 3.44\%$
 $w_{Cr} = 1.05\%$, $w_P = 0.010\%$
 $w_S = 0.020\%$; 实线一回火后水冷;
虚线一回火后炉冷

2.8 钢的淬透性

1. 钢的理想淬透直径 (图 2-46 ~ 图 2-50 和表 2-25)

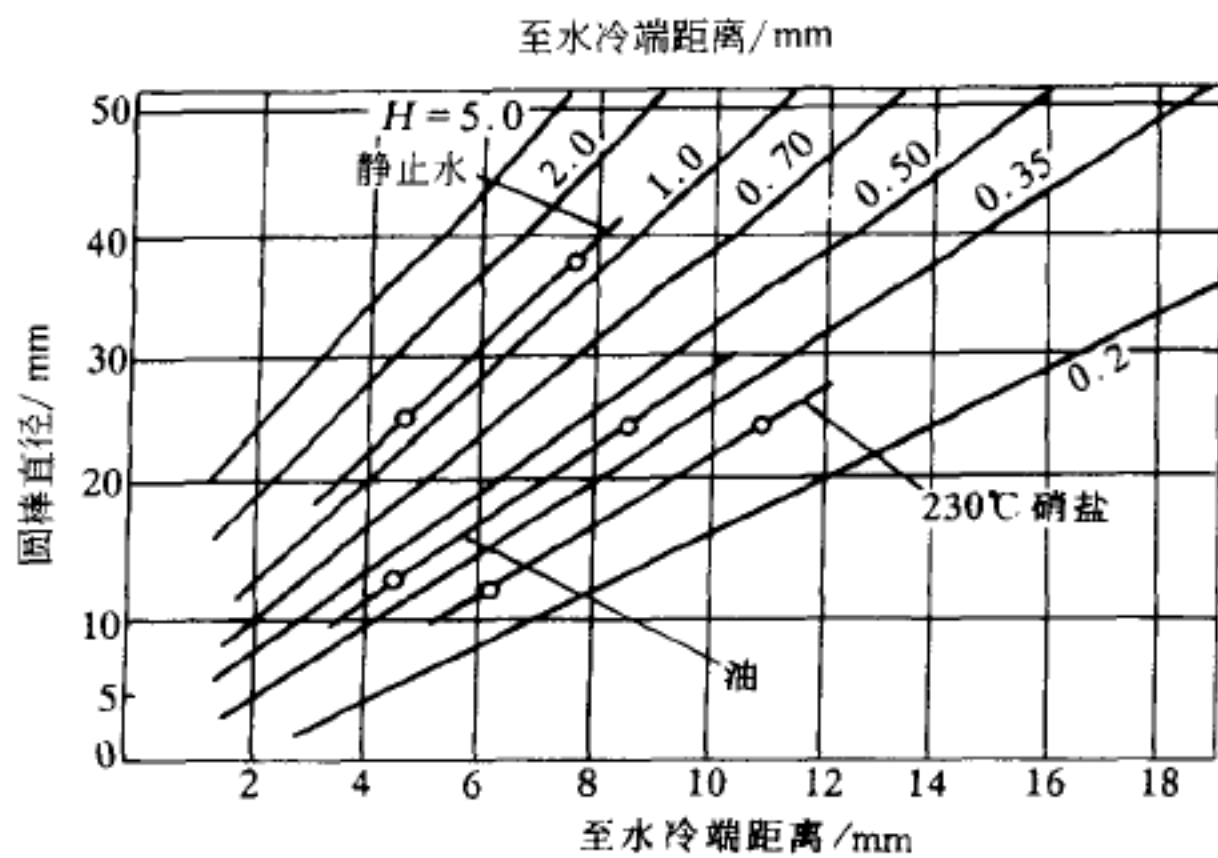


图 2-46 不同直径棒中心和端淬试样上各点具有相同冷速的对应关系

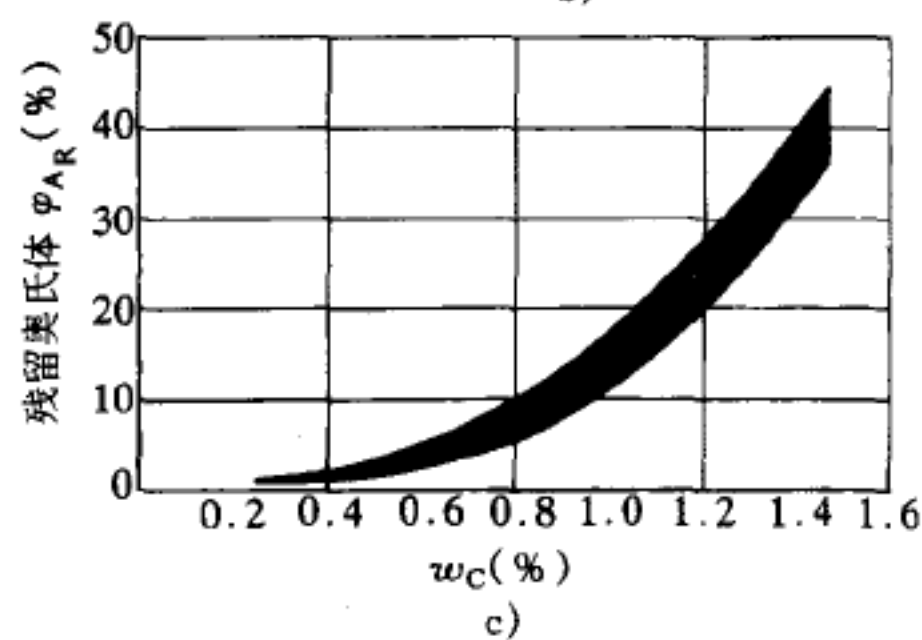
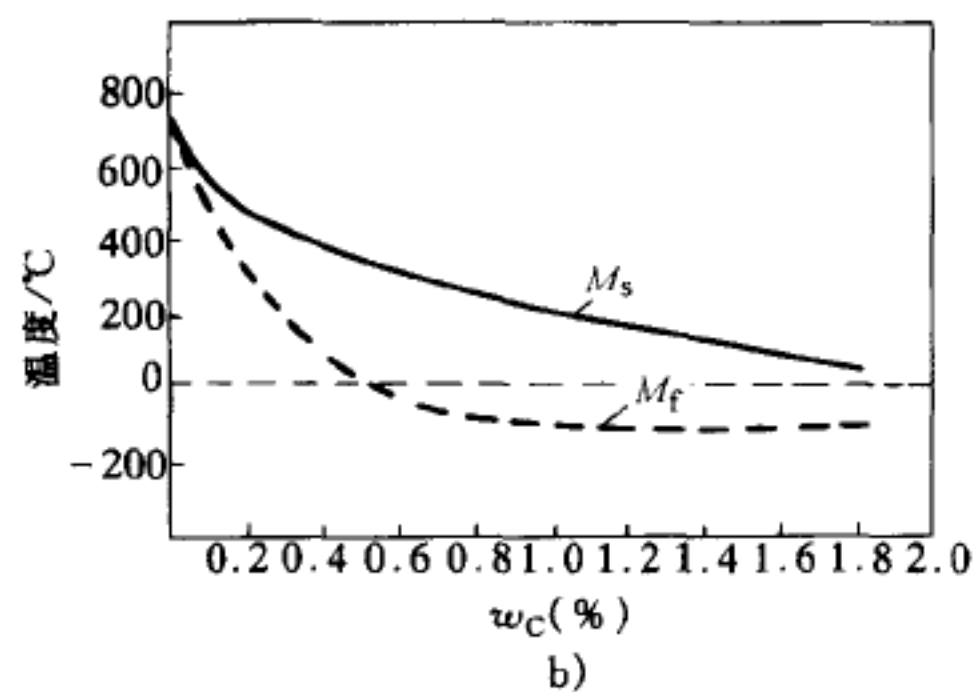
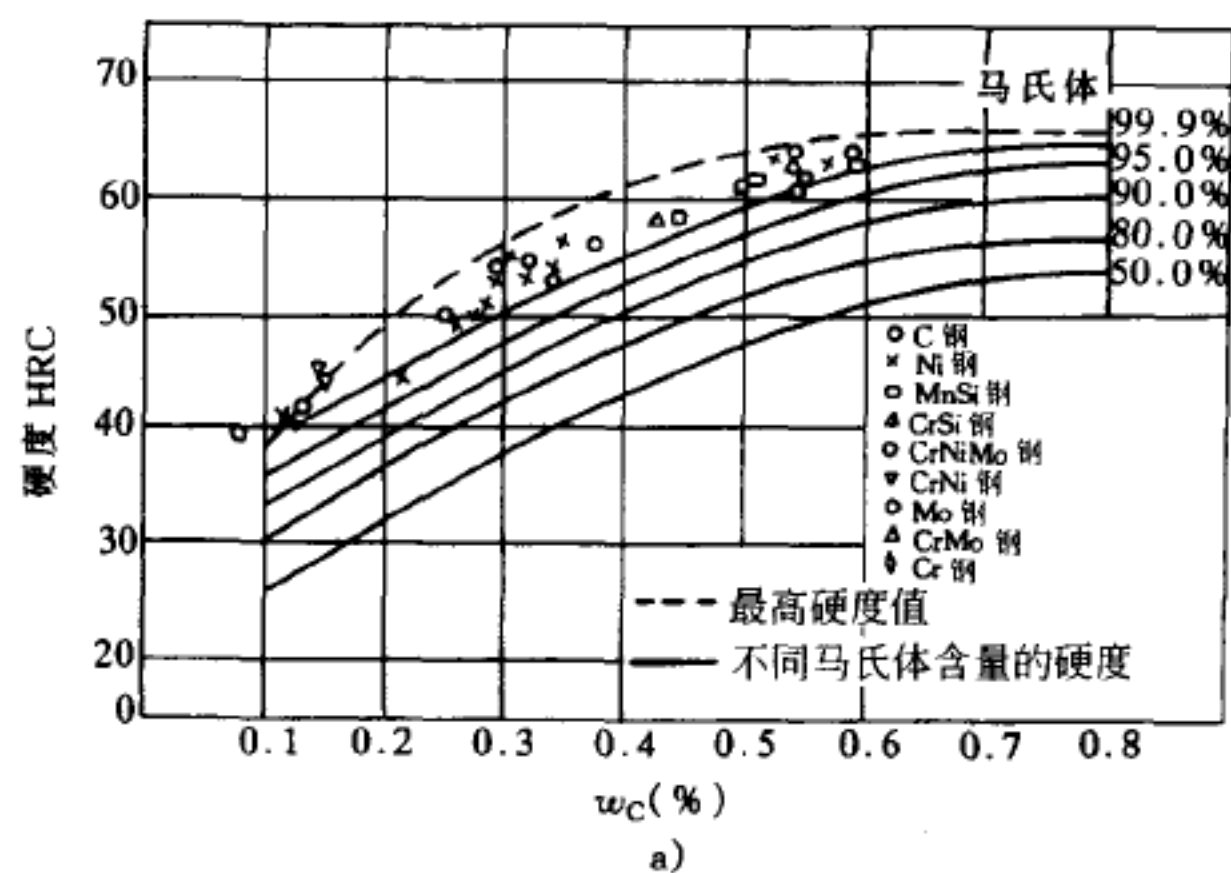


图 2-47 钢中碳含量对不同马氏体含量组织的硬度

a)、b) 马氏体点 M_s 和 M_f , c) 残留奥氏体量的影响表 2-25 常用淬火剂淬火烈度 H 值

搅动情况	淬 火 剂				
	H 值	空气	矿物油	水	盐水
静止		0.02	0.25 ~ 0.30	0.9 ~ 1.0	2
弱搅动		—	0.30 ~ 0.35	1.0 ~ 1.10	2 ~ 2.2
中等搅动		—	0.35 ~ 0.40	1.2 ~ 1.3	—
良好搅动		—	0.40 ~ 0.50	1.4 ~ 1.5	—
强搅动		0.05	0.5 ~ 0.80	1.6 ~ 2.0	—
猛烈搅动或高速喷射		—	0.80 ~ 1.10	4.0	5.0
端淬法喷水		—	2.5	—	—

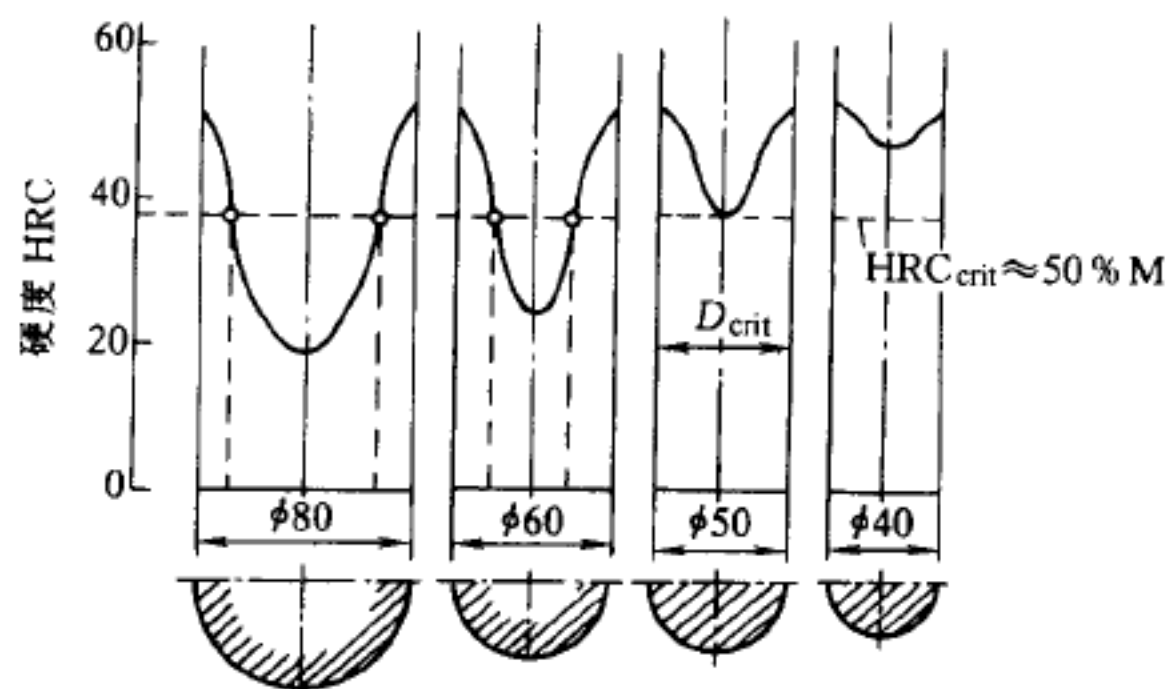


图 2-48 按 Grossmann 测出的钢的
淬火临界直径

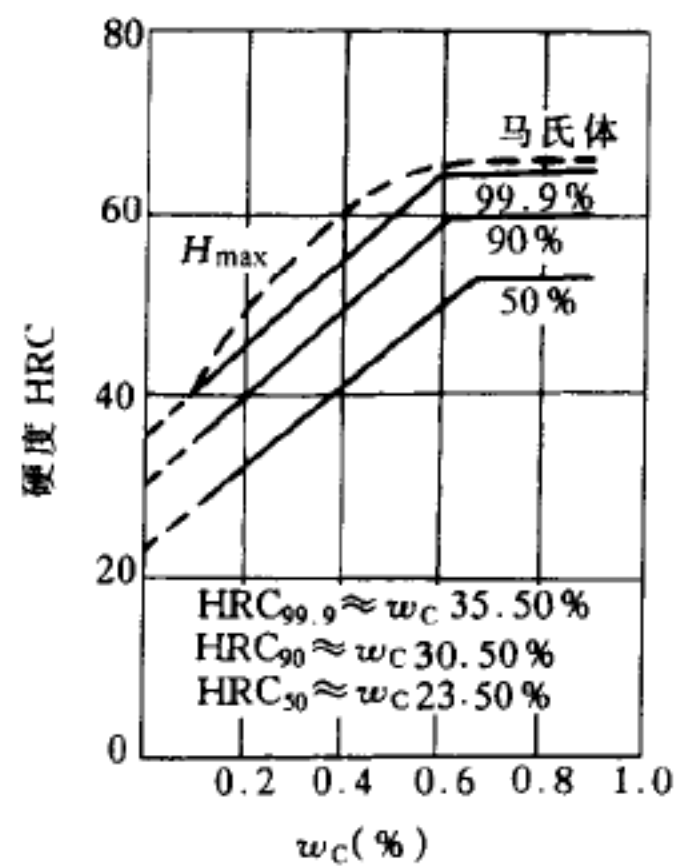


图 2-49 钢中不同马氏体含量的
硬度与碳含量的关系

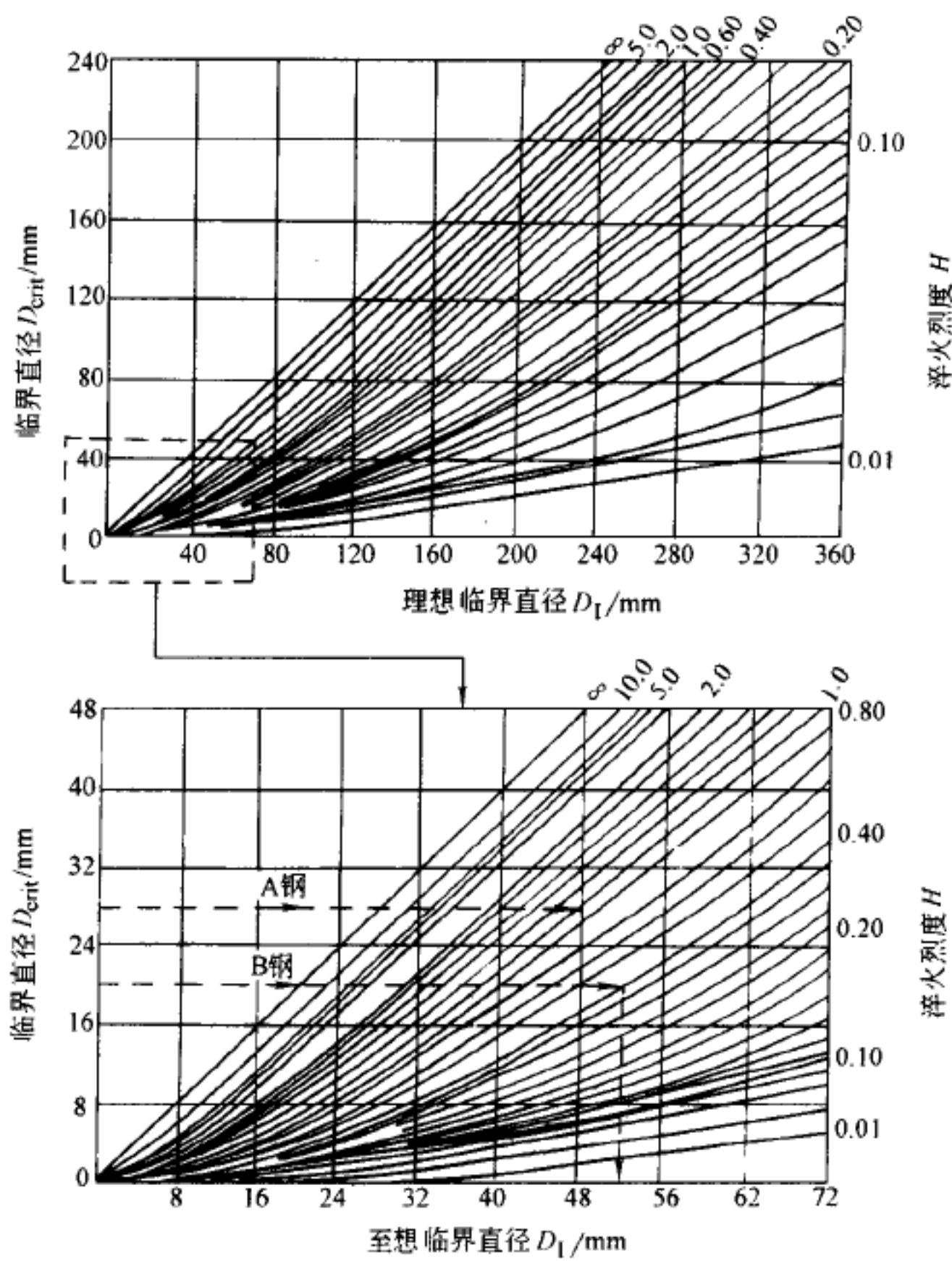


图 2-50 按 Grossmann 淬火烈度临界直径 D_{crit} 和
理想临界直径 D_l 相互转换图

2. 端淬试验 (图 2-51 ~ 图 2-66 和表 2-26)

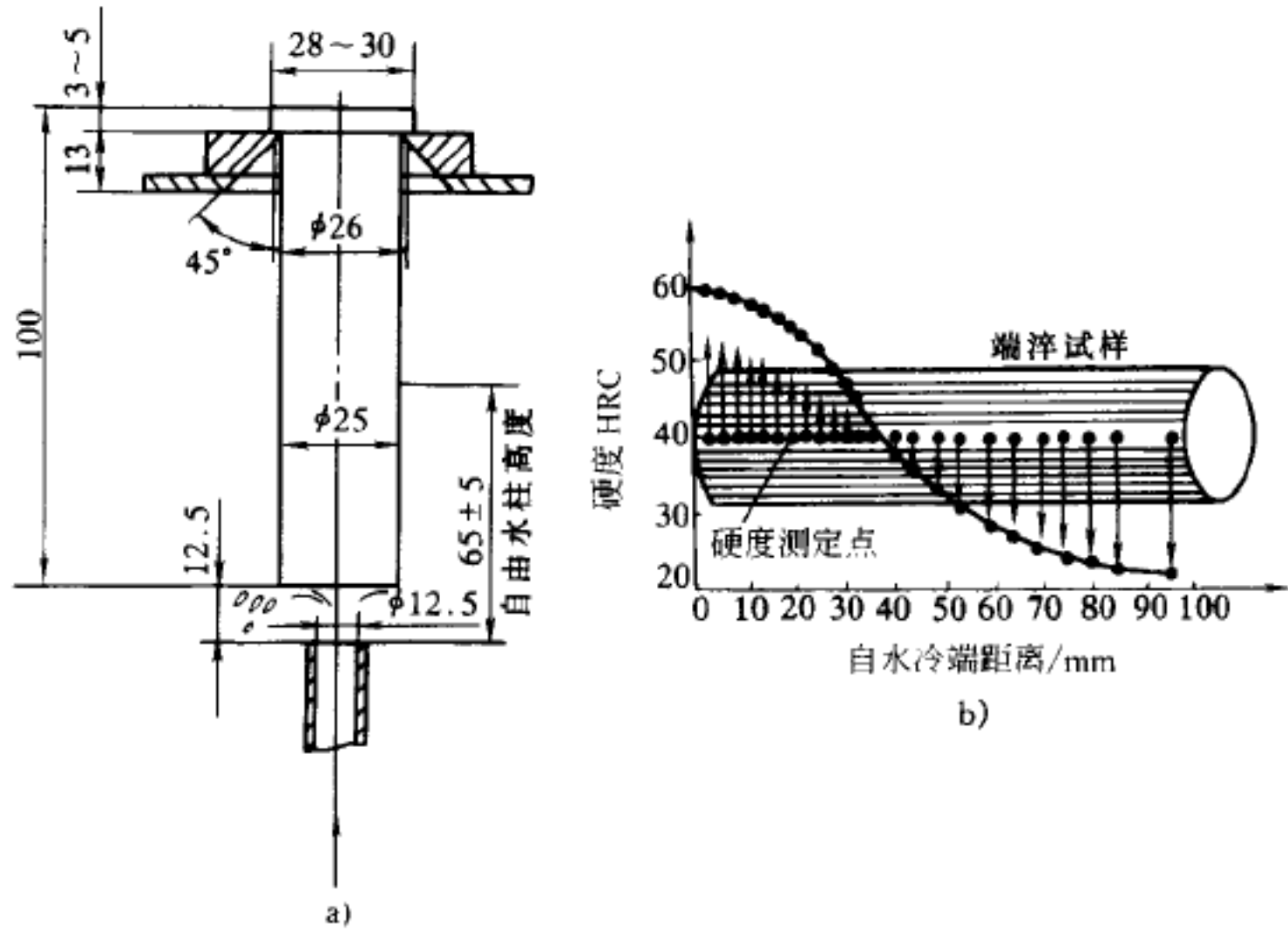


图 2-51 端淬试验试样、试验装置及端淬曲线的测定

a) 试样及试验装置 b) 端淬曲线测定示意

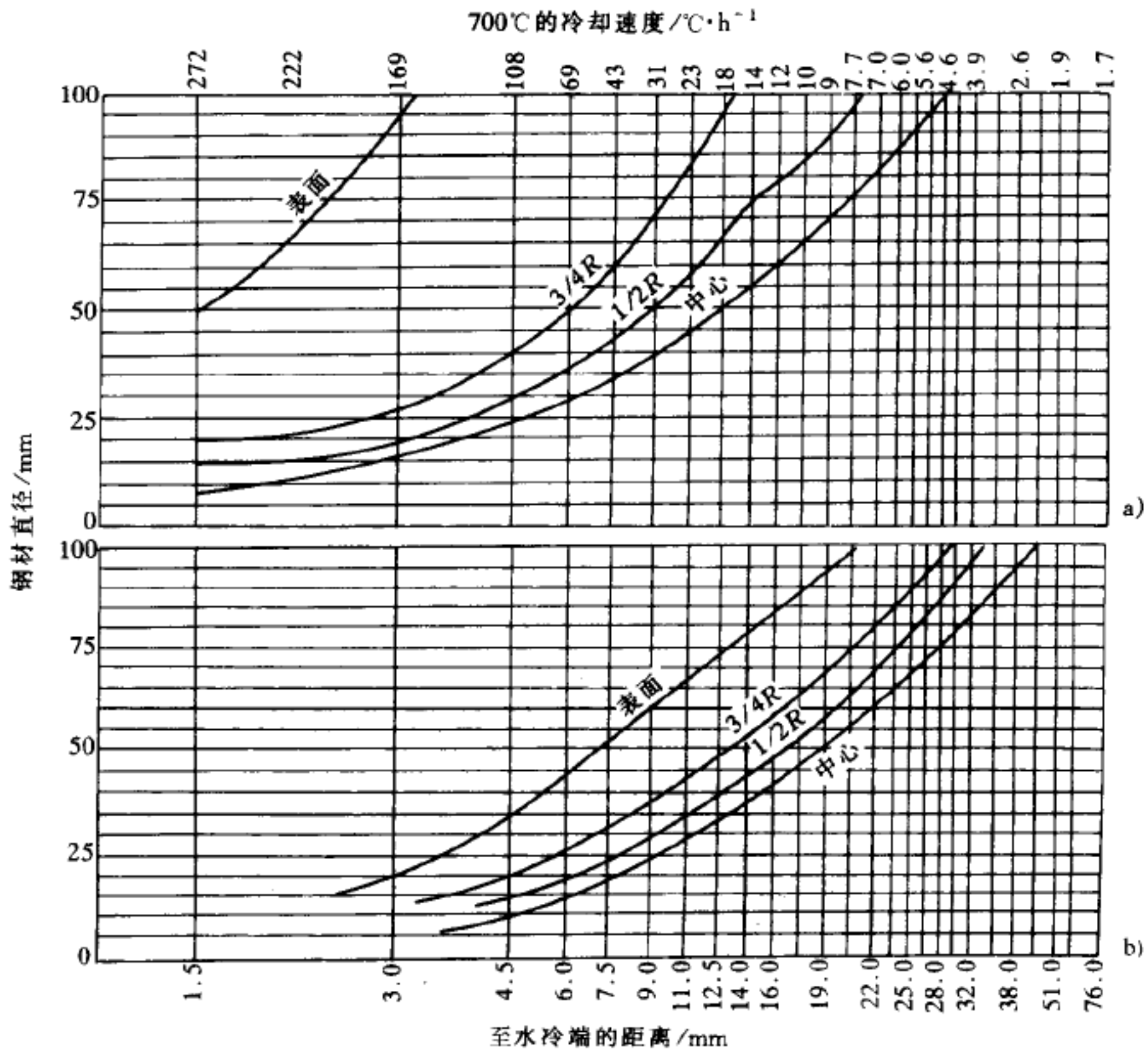


图 2-52 圆棒上几个指定部位与端淬试样指定点冷速相同时，指定点至水冷端距离与圆棒直径的对应关系

a) 水中淬火 b) 油中淬火

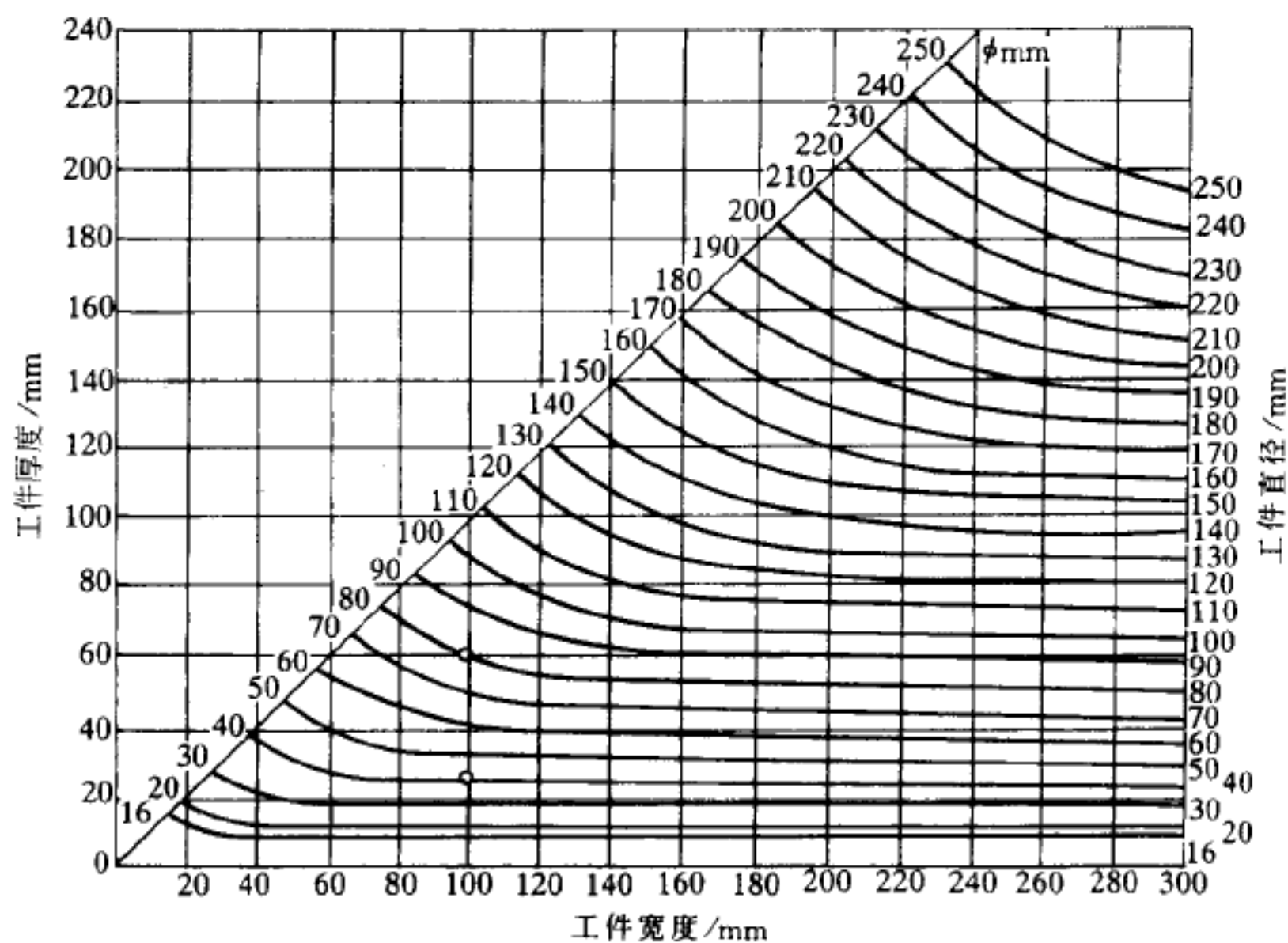
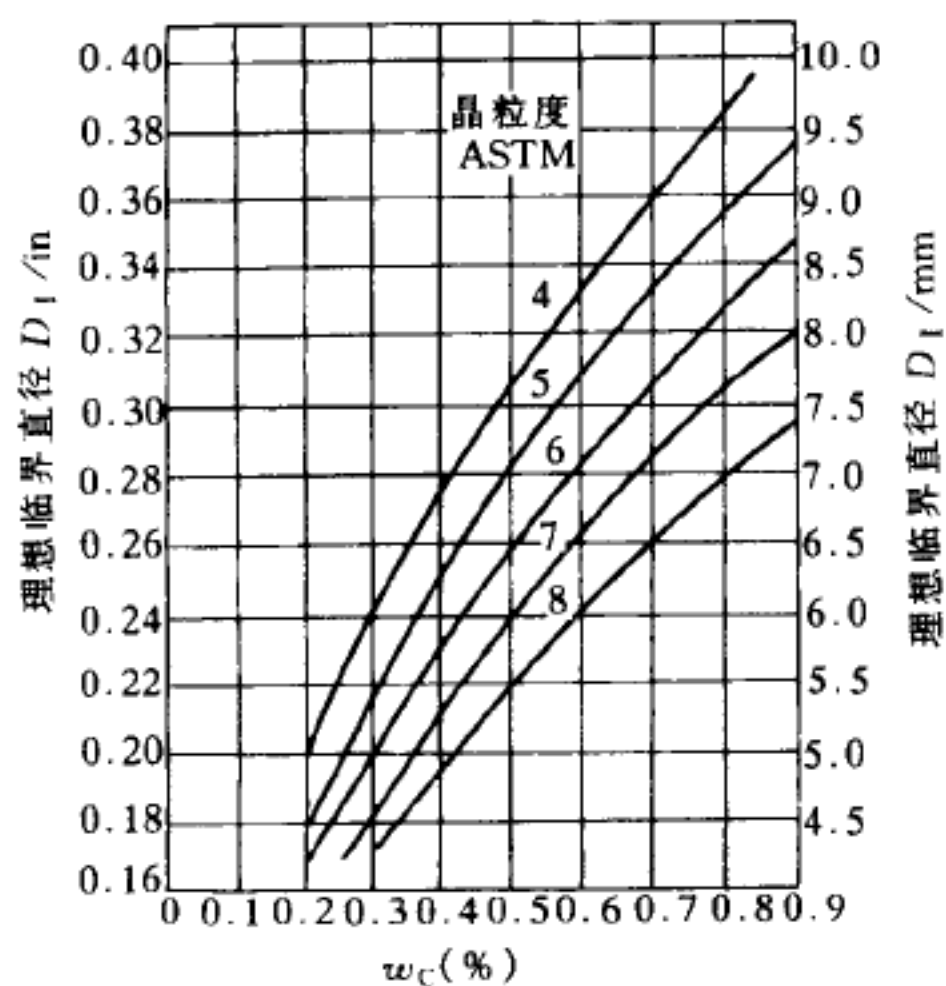
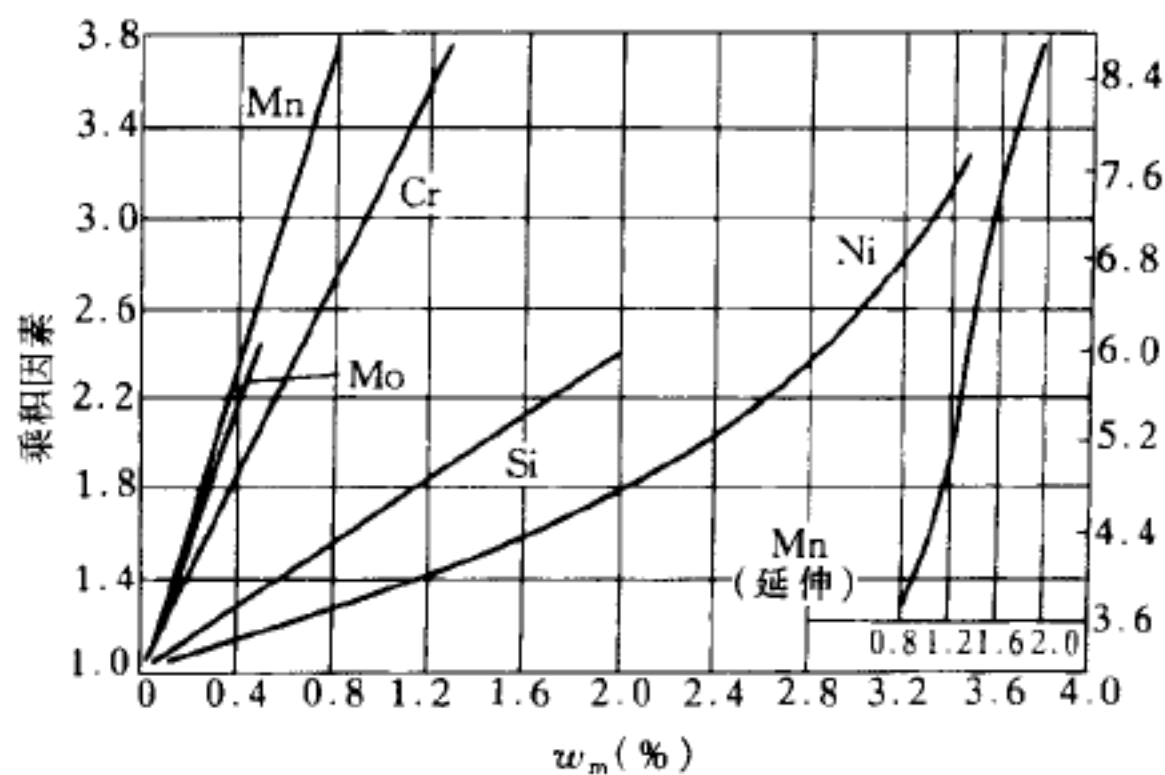


图 2-53 矩形和圆形等效截面换算图 (按 ISO 规定)

图 2-54 普通碳钢理想临界直径 D_I 碳含量和奥氏体晶粒度的关系 (按 Grossmann)注: $1\text{in} = 25.4\text{mm}$ 图 2-55 计算淬透性 D_I 值时的合金元素含量乘积因子 (按 AISI)

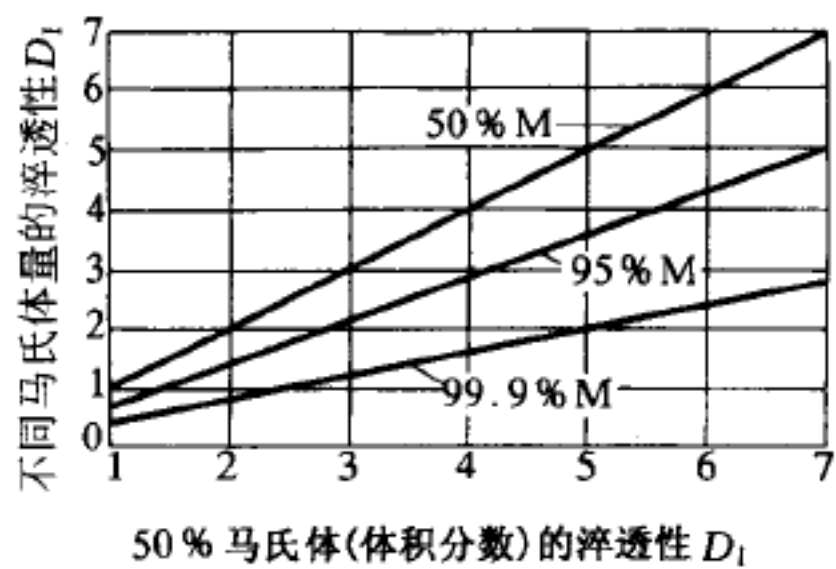


图 2-56 碳含量与半马氏体硬度的关系

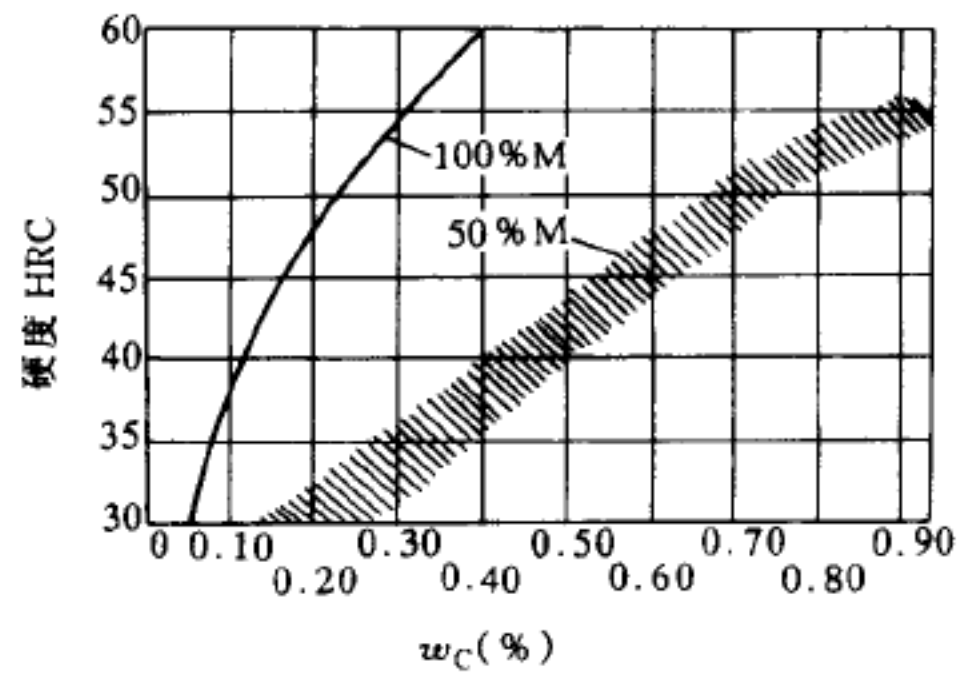


图 2-57 不同马氏体（体积分数）含量显微组织的淬透性 D_1 和规定淬透性 D_1 的换算图

表 2-26 常用钢的临界直径

钢 号	半马氏体区 硬 度 HRC	20~40℃水中冷 却的临界直径 /mm	矿物油中冷却 的临界直径 /mm	钢 号	半马氏体区 硬 度 HRC	20~40℃水中冷 却的临界直径 /mm	矿物油中冷却 的临界直径 /mm
35	38	8~12	4~8	40Mn2B	44	47~52	27~40
40	40	10~15	5~9.5	40MnVB	44	60~76	40~58
45	42	13~16.5	6~9.5	20MnVB	38	55~62	32~46
60	47	11~17	6~12	20MnTiB	38	36~42	22~28
T10	55	10~15	<8	35SiMn	43	40~46	25~34
40Mn	44	12~18	7~12	35CrB	43	31~44	19~31
40Mn2	44	25~100	15~90	35CrMo	43	36~42	20~28
45Mn2	45	25~100	15~90	30CrMnSi	41	40~50	23~40
65Mn	53	25~30	17~25	40CrMnMo	44	≥150	≥110
15Cr	35	10~18	5~11	38CrMoAlA	43	100	80
20Cr	38	12~19	6~12	60Si2Mn	52	52~62	32~46
30Cr	41	14~25	7~14	50CrVA	48	55~62	32~40
40Cr	44	30~38	19~28	180CrMnTi	37	22~35	15~24
45Cr	45	30~38	19~28	30CrMnTi	41	40~50	23~40
40MnB	44	50~55	28~40	40CrMnTi	44	55~60	32~40

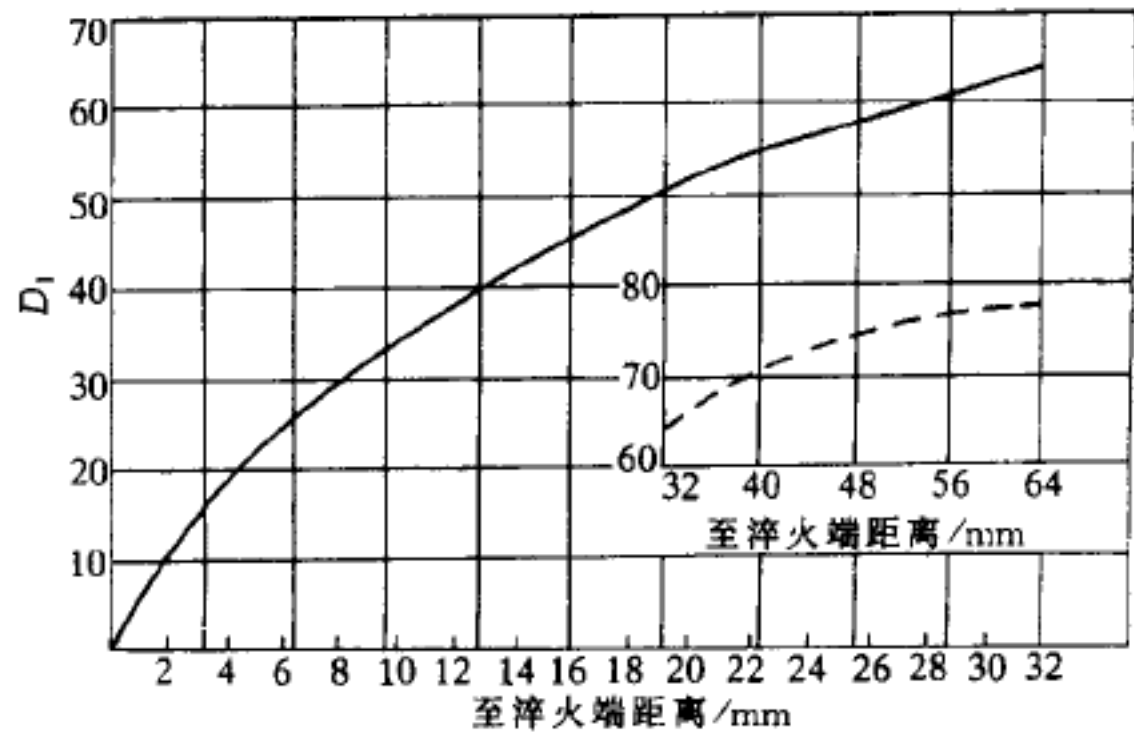


图 2-58 端淬距离和 D_1 间的关系

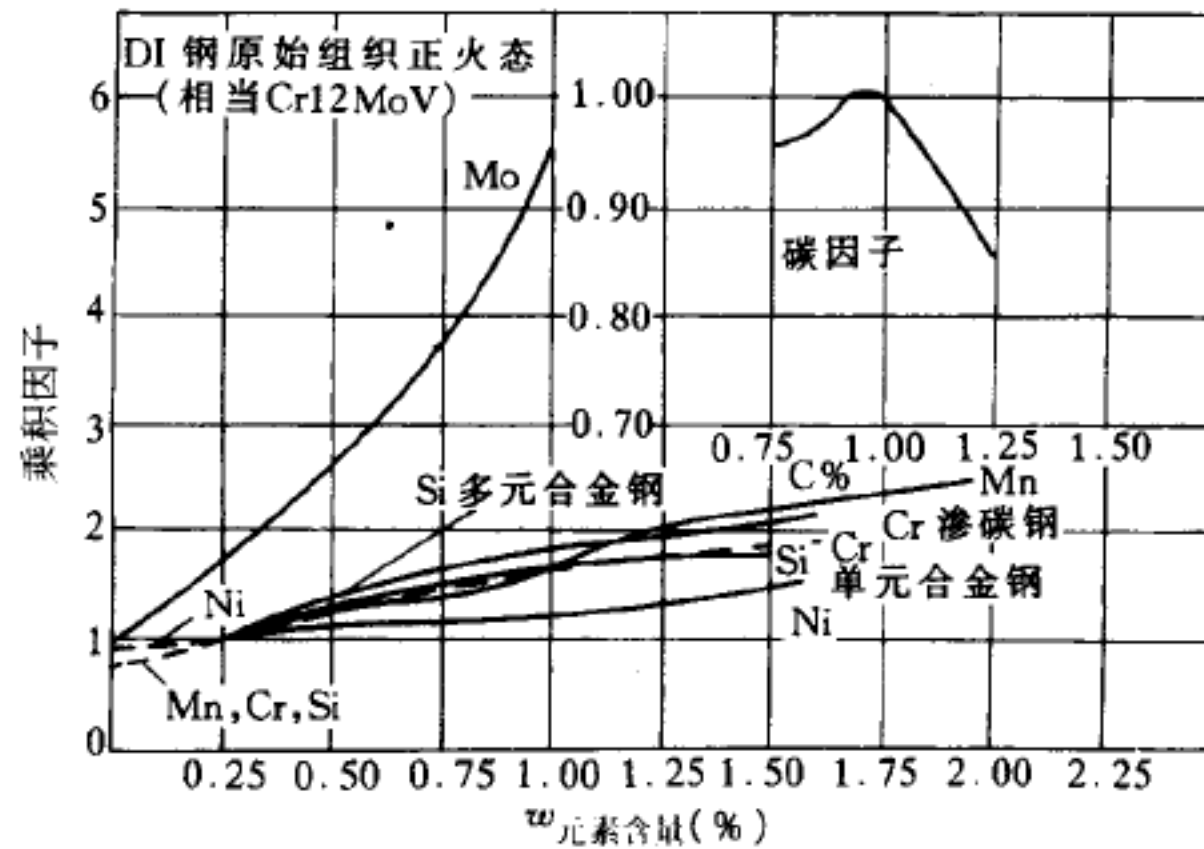


图 2-59 正火态原始组织高碳钢计算淬透性的乘积因子至淬火端距离/mm

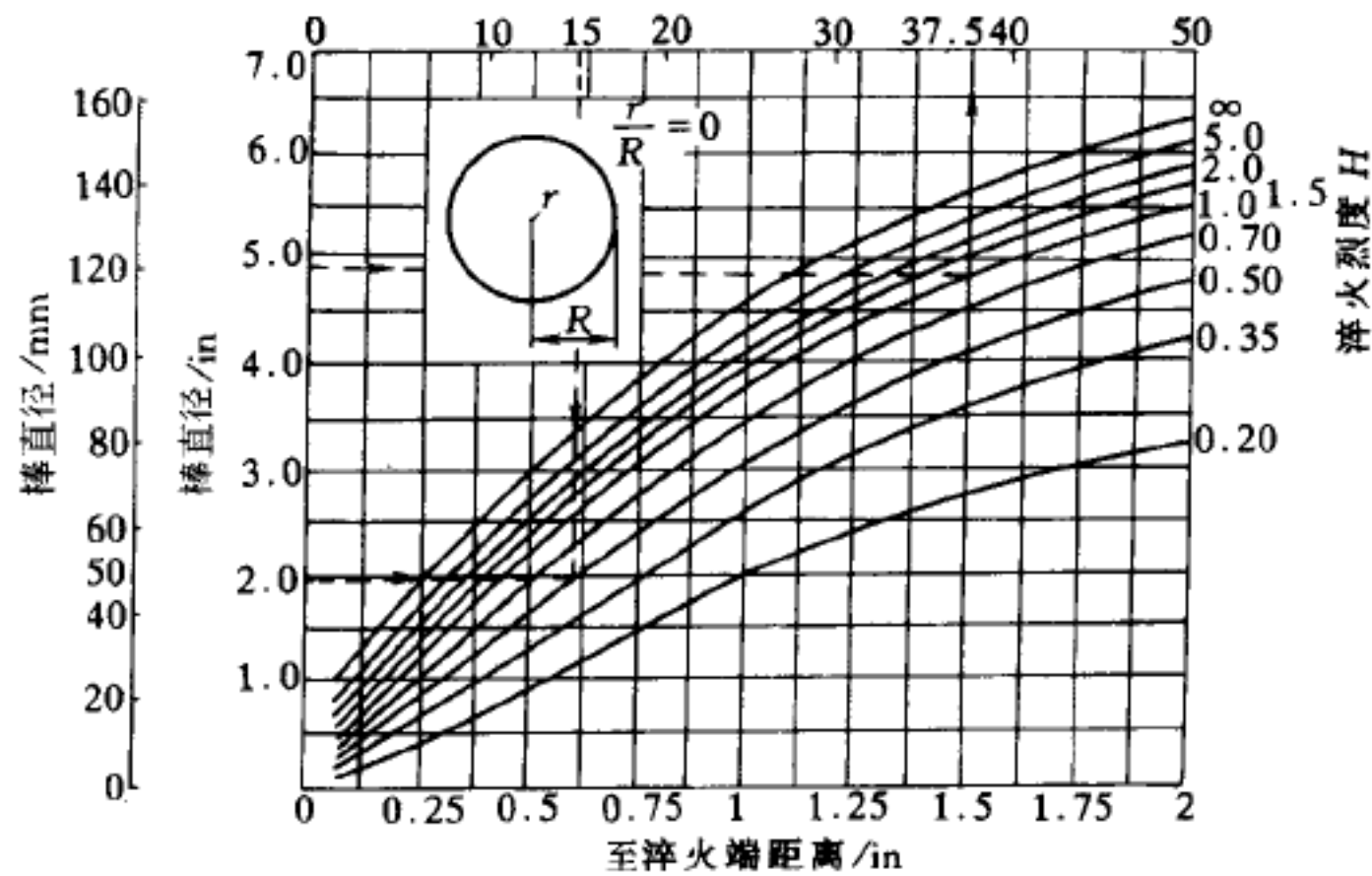


图 2-60 在不同淬火烈度条件下端淬试样距离和圆棒心部 ($r/R = 0$) 的换算关系

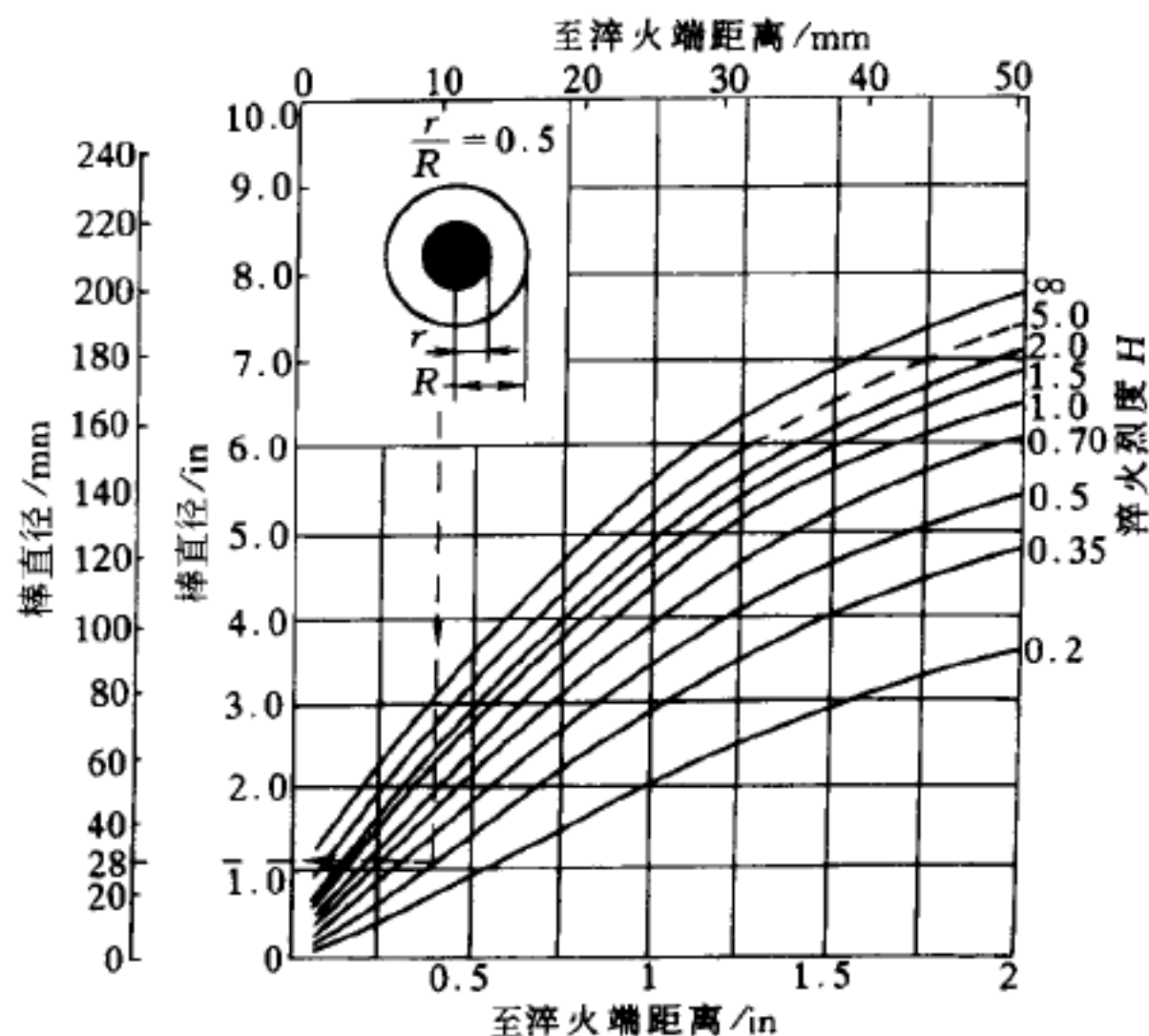


图 2-61 在不同淬火烈度条件下，端淬试样距离和圆棒 $r/R = 0.5$ 处的换算关系

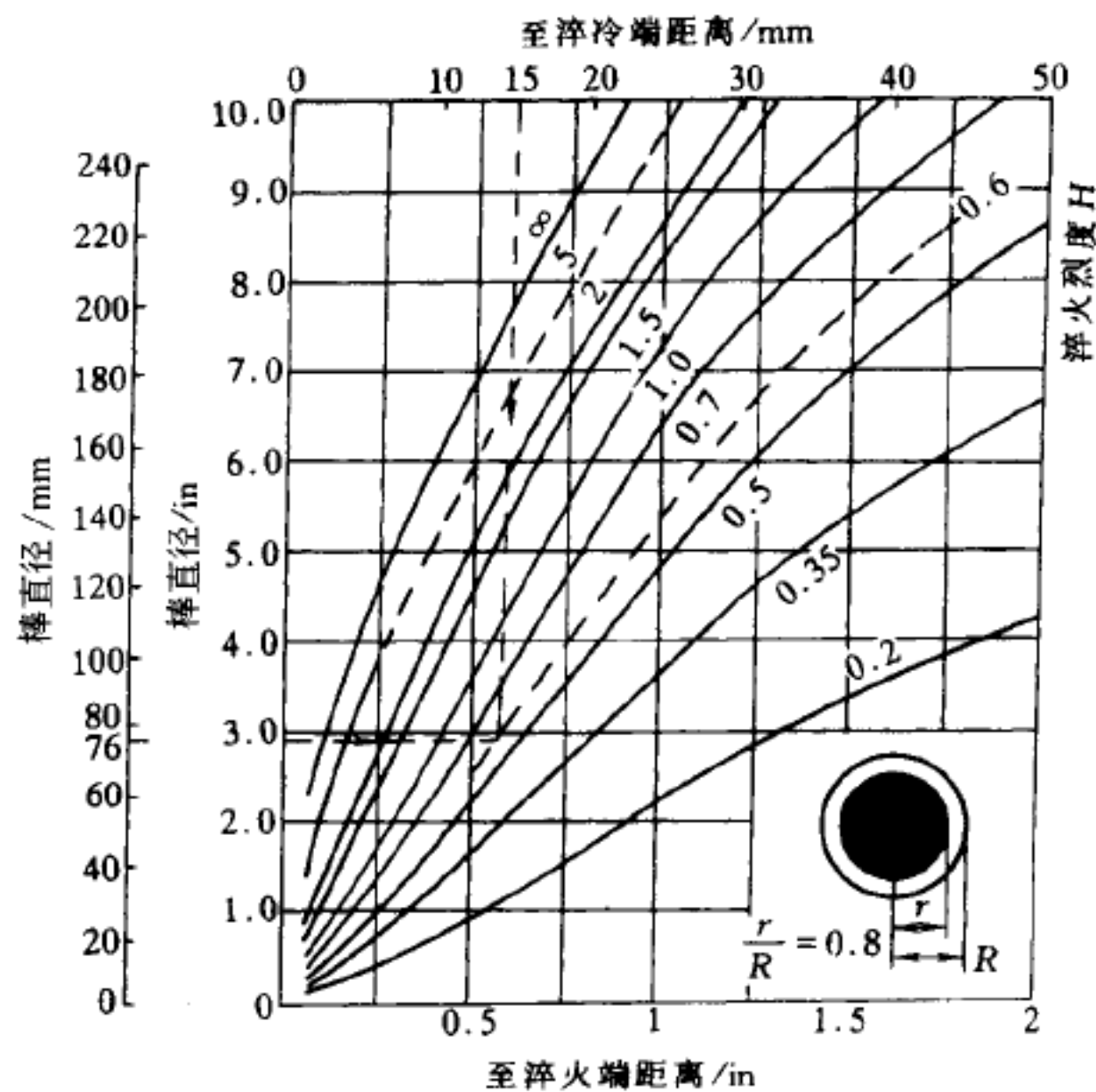


图 2-62 在各种淬火烈度条件下, 端淬试样距离和圆棒 $r/R = 0.8$ 间的关系

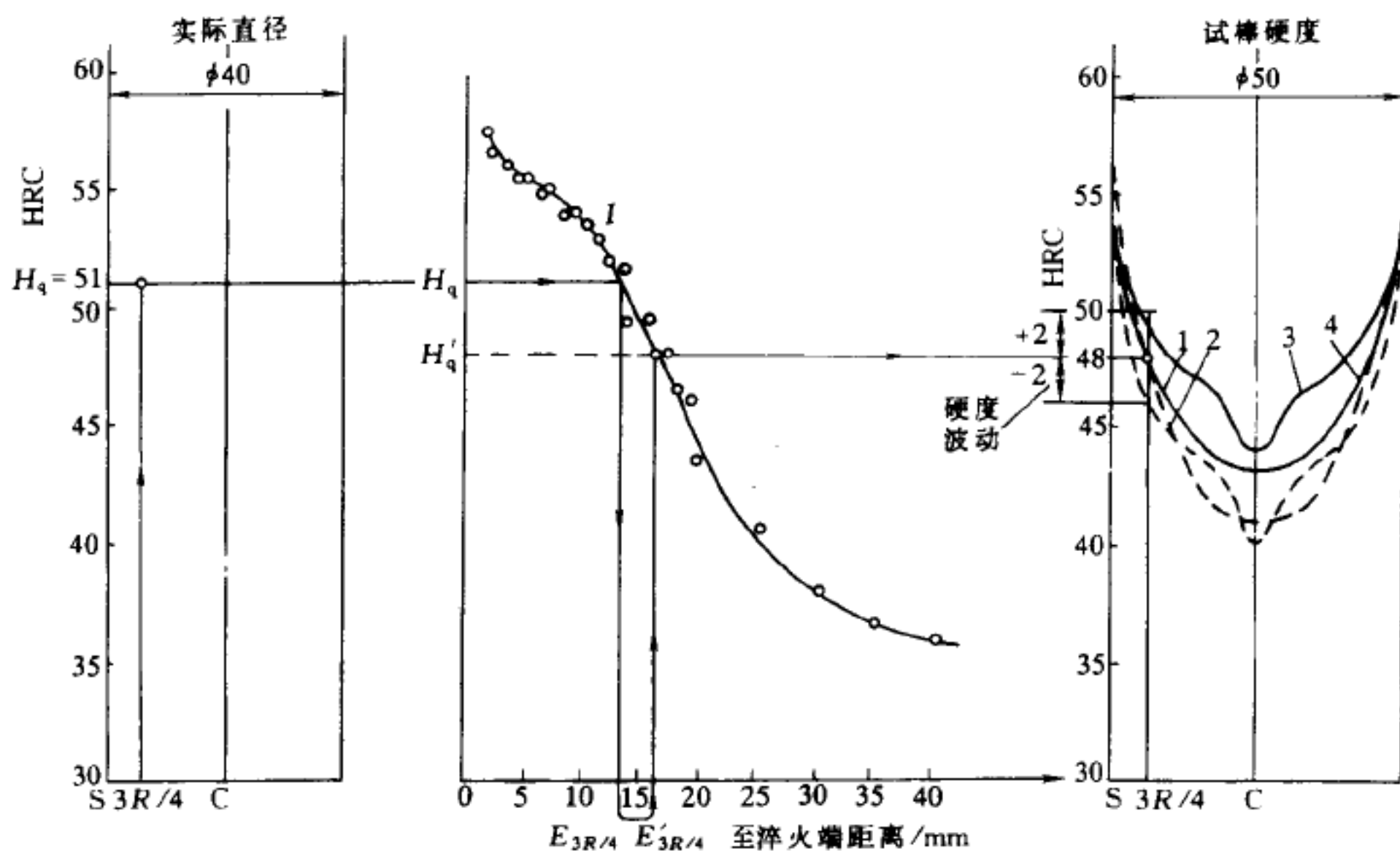


图 2-63 淬冷条件计算机辅助选择一例淬冷条件

1—混合矿油 20°C: 1m/s 2—混合矿油 20°C: 1.6m/s 3—混合矿油 70°C: 1.0m/s

4—盐浴-AS-140: 200°C: 0.6m/s

I: 下列钢种的淬透性曲线 C.4732 (SAE 4140H) -8.No.89960

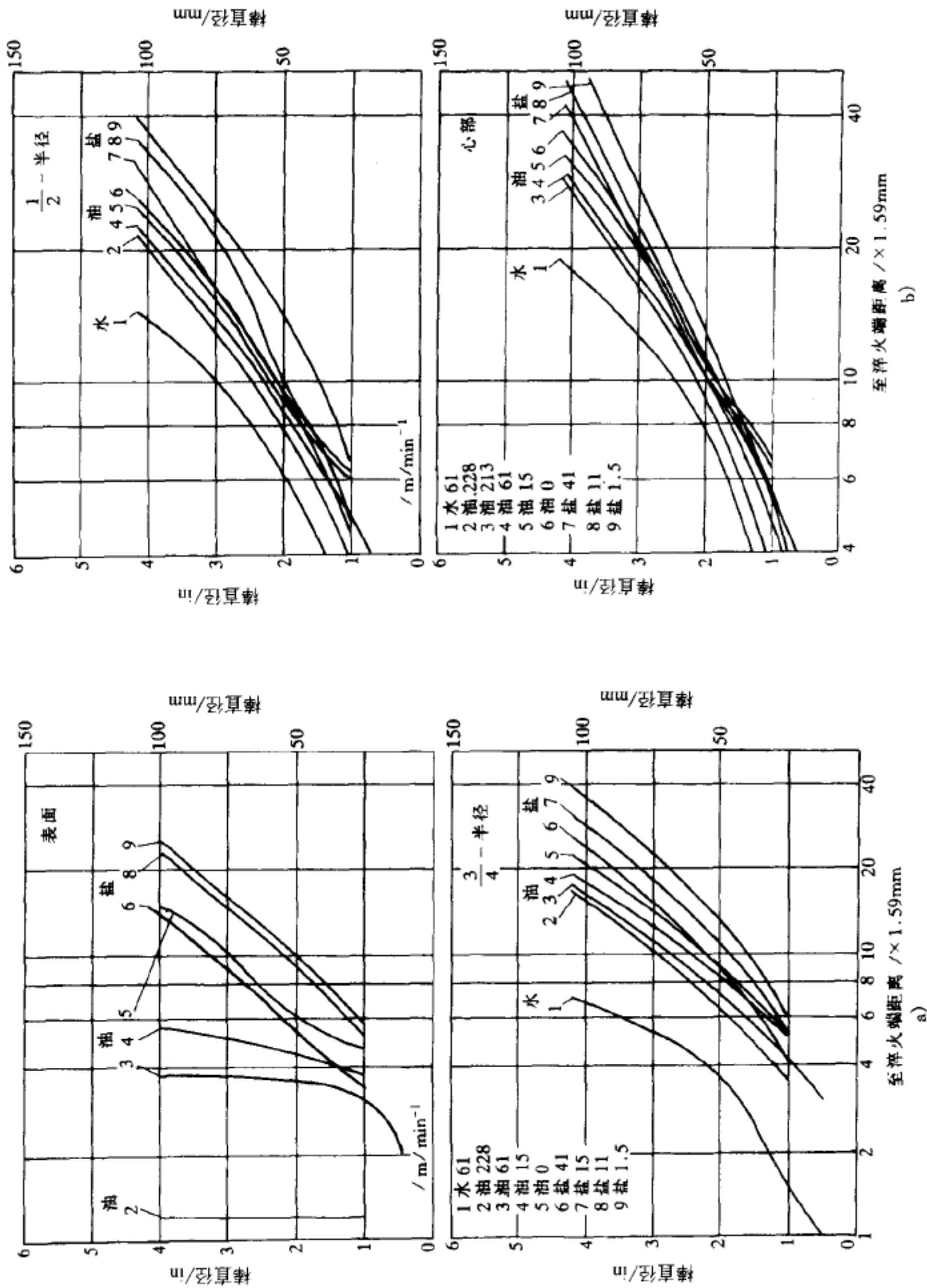


图 2-64 端淬试样和圆棒在热盐浴、油和水中的淬透性关系
(冷却温度范围: 表面从 732℃ 到 315℃, 3/4 半径从 732℃ 到 371℃, 1/2 半径从 732℃ 到 482℃, 心部从 732℃ 到 662℃, 水温 24℃, 油温 49℃, 38℃ 的赛氏粘度为 79s, 熔盐温度 204℃)

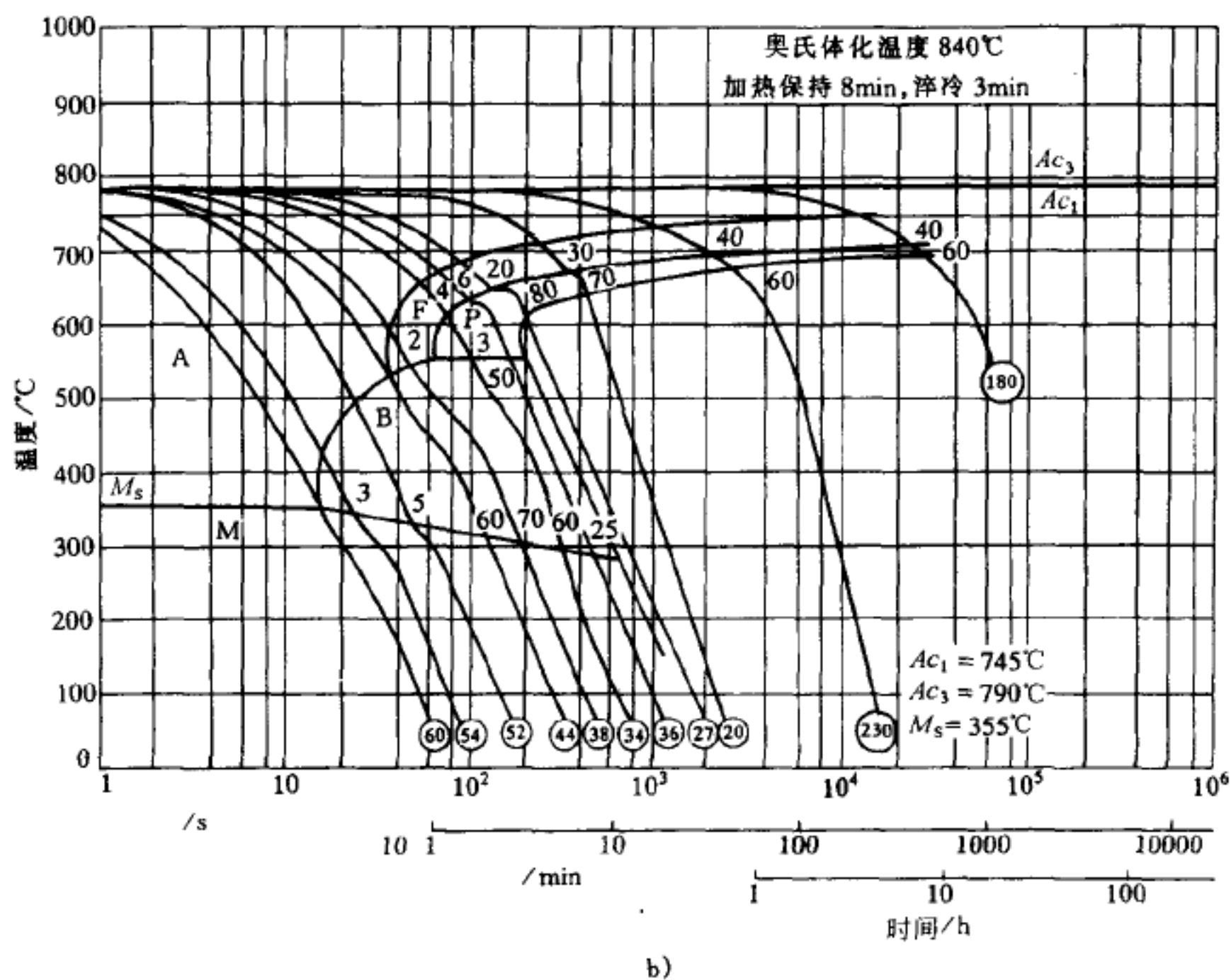
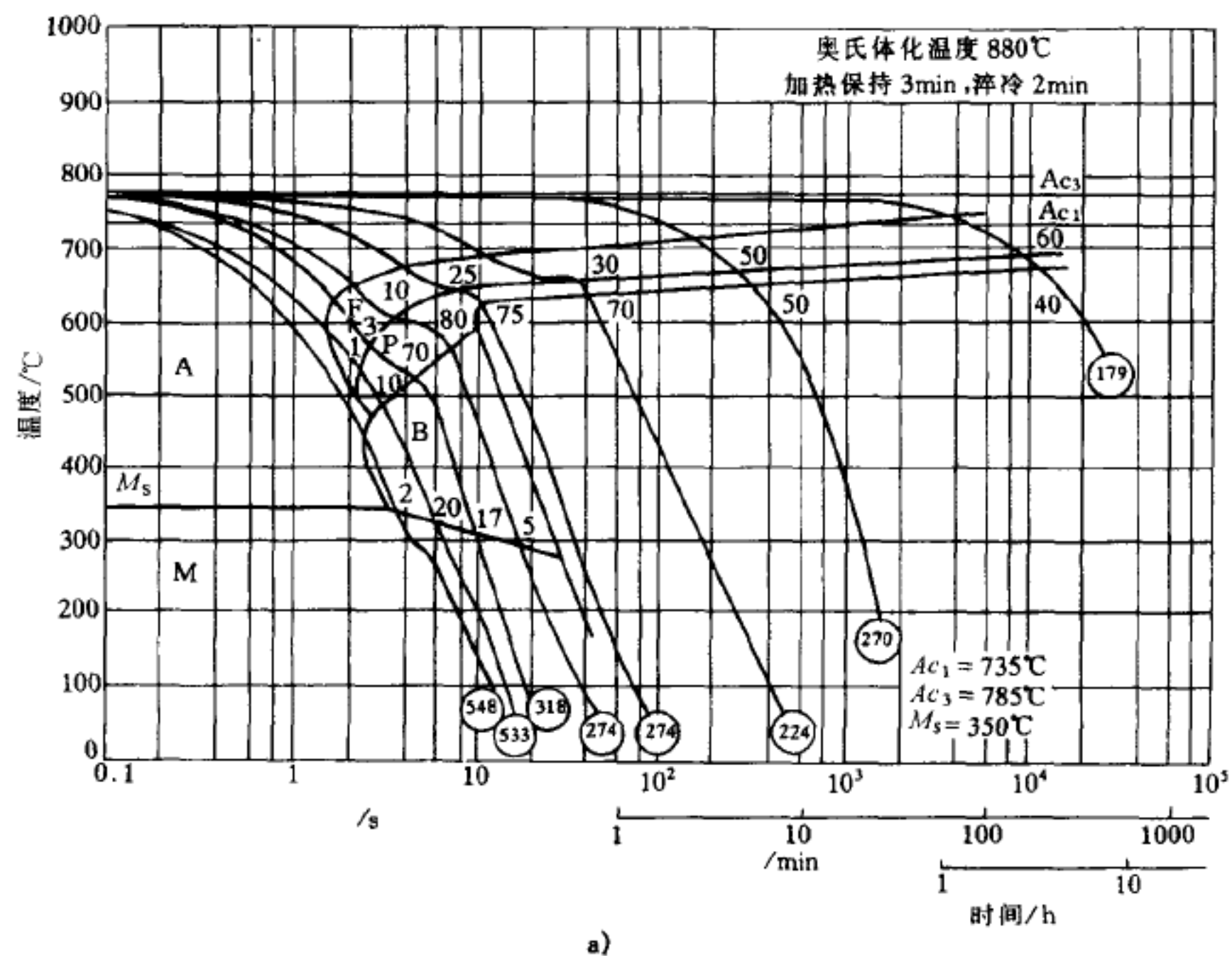


图 2-65 钢的淬火冷却速度与组织和性能的关系

a) CK45 (SAE1042) 钢, 化学成分 (质量分数): C0.44%, Mn0.66%, Si0.22%, S0.029%, P0.22%, Cr0.16%, V0.02%, 接近于 45 钢 b) 41Cr4 (SAE5140) 钢, 化学成分 (质量分数): C0.44%, Mn0.80%, Si0.22%, P0.030%, S0.023%, 含 Cr1.04%, Cu0.17%, Mo0.04%, Ni0.26%, V < 0.01%, 接近于 40Cr

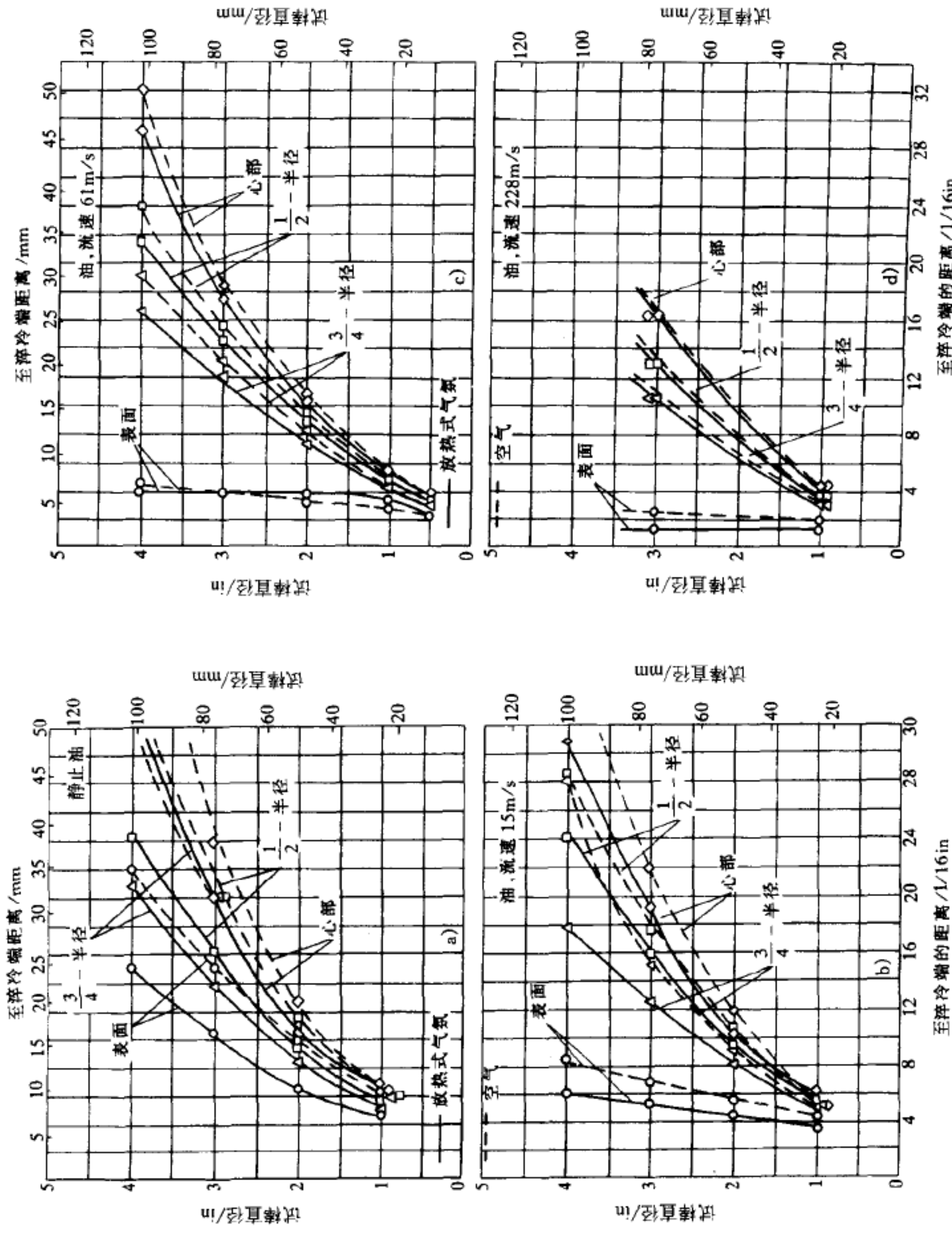


图 2-66 端淬试棒和油中淬火试棒在相同时间内的冷却曲线

(所用矿物淬火油在 38℃ 的赛氏粘度为 79S)。

试棒冷却温度范围：表面 732℃→375℃，3/4 半径 732℃→371℃，

1/2 半径 732℃→426℃，心部 732℃→482℃

第3章 金属和合金材料牌号表示方法及世界主要国家常用钢和合金牌号相似对照

3.1 国产钢钢号命名法 (表 3-1 ~ 表 3-3)

1. 总则

1) 钢牌号的命名采用汉语拼音字母、化学元素符号和阿拉伯数字结合的表示方法, 稀土元素用 RE 表示, 以避免和 Re (金属元素铼) 混淆。

2) 采用汉语拼音字母表示产品名称、用途、特性和工艺方法 (见表 3-3)。

2. 普通碳素钢

按 GB/T700—1988, 钢的牌号由代表屈服点的字母, 屈服点的数值、质量等级符号、脱氧方法符号四个部分按顺序组成。例如 Q235-A, F 即屈服点 (Q) 为 235MPa 的甲 (A) 类沸腾 (F) 钢。质量分 A、B、C、D 四个等级, 半镇静钢用 b 表示, 镇静钢用 Z 表示。

3. 优质碳素结构钢

1) 开头的阿拉伯数字表示以万分之几计的平均碳含量。

2) 沸腾钢和半镇静钢在牌号尾部分别加符号 F 和 b, 镇静钢不加符号。如平均碳含量为 $w_c = 0.10\%$ 的半镇静钢表示为 10b。

3) 含锰较高的优质碳素结构钢在阿拉伯数字后加 Mn。如含锰为 $0.7\% \sim 1.0\%$ 、含碳为 0.5% 的钢表示为 50Mn。

4) 低 P、S 杂质的高级优质碳素钢在尾部加 A, 如 20A。

5) 专用优质碳素结构钢在尾部加用途符号, 如含碳 0.2% 的锅炉钢表示为 20g。

4. 碳素工具钢

1) 开头的阿拉伯数字表示以千分之几计的平均碳含量。

2) 以 T 表示的碳素工具钢后面的数字为以千分之几计的平均碳含量, 如 T10 表示平均碳含量为 1.0% 的碳素工具钢。

3) 含锰稍高 ($0.4\% \sim 0.6\%$) 的碳素工具钢在碳含量数字末尾加元素符号 Mn。

4) 低 P、S 杂质的高级优质碳素工具钢末尾加 A, 如 T8MnA。

5. 易切削钢

1) 以符号 Y 表示易切削钢, 后面的数字为以万分之几计的平均碳含量。

2) S 和 S、P 易切削钢牌号中不注明元素符号, 含 Ca、Pb、Se 元素的易切削钢, 后面加这些元素符号。

3) 含锰较高 ($1.2\% \sim 1.5\%$) 的易切削钢, 在碳含量数字后加元素符号 Mn、如 Y40Mn。

6. 合金结构钢

1) 开头的二位数字为以万分之几计的平均碳含量。

2) 平均合金元素含量小于 1.5% 时, 牌号中仅标明元素的化学符号, 一般不标明元素含量。

3) 平均合金含量为 $1.50\% \sim 2.49\%$ 、 $2.50\% \sim 3.40\%$ 、 $\cdots 22.50\% \sim 23.49\%$ 、 \cdots 时, 在元

素符号后的数字分别写成 2, 3, …, 23, …。

4) 高级优质合金结构钢、弹簧钢在牌号末尾加 A 字。

7. 合金工模具钢、高速钢

1) 一般不标碳含量数字, 若平均碳含量小于 1.0% 时, 可用以千分之几计的一位数字表示碳含量。

2) 合金元素含量数字标法与 6.3) 相同。

3) 低铬 (< 1%) 合金工具钢的铬含量以千分之几计的两位数表示, 在一位数字前加“0”, 如平均铬含量为 0.6% 的合金工具钢表示为 Cr06。

8. 高碳轴承钢

1) 一般不标出平均碳含量。

2) 铬含量以千分之几计, 在牌号开头加符号 G, 如含铬为 0.9% 的轴承钢表示为 GCr9。

9. 铸钢

1) 用化学元素符号、表 3-3 规定符号和阿拉伯数字来表示。

2) 碳素铸钢、合金结构铸钢、不锈钢耐酸铸钢, 耐热钢在开头加 ZG。轧辊用铸钢在开头加 ZU。

3) 铸钢符号后面的数字, 或数字加元素符号表示钢的主要成分和含量, 如平均碳含量为 $w_c = 0.45\%$ 的碳素铸钢表示为 ZG45。

表 3-1 普通碳素结构钢 GB700 新旧牌号对照

GB700—1988	GB700—1979
Q195 不分等级, 化学成分和力学性能(抗拉强度、伸长率和冷弯)均须保证, 但轧制薄板和盘条之类产品, 力学性能的保证项目, 根据产品特点和使用要求, 可在有关标准中另行规定	1. 钢号 Q195 的化学成分与本标准 1 号钢的乙类钢 B1 相同, 力学性能(抗拉强度、伸长率和冷弯)与甲类钢 A1 相同(A1 的冷弯试验是附加保证条件)。1 号钢没有特类钢
Q215 A 级 B 级(做常温冲击试验, V 形缺口)	A2 C2
Q235 A 级(不做冲击试验) B 级(做常温冲击试验, V 形缺口) C 级(作为重要焊接结构用) D 级	A3(附加保证常温冲击试验, U 形缺口) C3(附加保证常温或 -20℃ 冲击试验, U 形缺口) — —
Q255 A 级 B 级(做常温冲击试验, V 形缺口)	A4 C4(附加保证冲击试验, U 形缺口)
Q275 不分等级, 化学成分和力学性能均须保证	C5

表 3-2 中国钢号所采用的缩写字母及其涵义(按拉丁字母为序)

采用的缩写字母	在钢号中位置	含义	缩写字母来源	
			汉字	拼音
A	尾	质量等级符号	—	
B	尾	质量等级符号	—	
b	尾	半镇静钢	半	Ban

(续)

采用的缩写字母	在钢号中位置	含义	缩写字母来源	
			汉字	拼音
C	尾 尾	1. 船用钢(旧钢号) 2. 质量等级符号	船 —	Chuan
D	尾	质量等级符号	—	
d	尾	低淬透性钢	低	Di
DG	头	电信用取向高磁感硅钢	电高	Dian Gao
DR	头	电工用热轧硅钢	电热	Dian Re
DT	头	电磁纯铁	电铁	Dian Tie
DZ	头	地质钻探管用钢	地质	Di Zhi
E	尾	质量等级符号	—	
F	头 尾 头	热锻用非调质钢 沸腾钢 含钒生铁	非 沸 钒	Fei Fei Fan
G	头	滚动轴承钢	滚	Gun
CH	头	变形高温合金	高合	Gao He
g	尾	锅炉用钢	锅	Guo
gC	尾	多层或高压容器用钢	高层	Gao Ceng
H	头 尾	焊接用钢 保证淬透性钢	焊 —	Han
HP	尾	焊接气瓶用钢	焊瓶	Han Ping
HT	头	灰铸铁	灰铁	Hui Tie
J	中	精密合金	精	Jing
JZ	头	机车车轴用钢	机轴	Ji Zhou
K	头 尾	1. 铸造高温合金 2. 矿用钢	— 矿	Kuang
KT	头	可锻铸铁	可铁	Ke Tie
L	头 尾	1. 汽车大梁用钢 2. 炼钢用生铁	梁 炼	Liang Lian
LZ	头	车辆车轴用钢	辆轴	Liang Zhou
M	头	锚链钢	锚	Mao
ML	头	铆螺钢	铆螺	Mao Luo
NH	尾	耐候钢	耐候	Nai Hou
NM	头	耐磨生铁	耐磨	Nai Mo
NS	头	耐蚀合金	耐蚀	Nai Shi
Q	头 中 头	1. 屈服点(碳结钢、低合金钢用) 2. 电工用冷轧取向硅钢 3. 球墨铸铁用生铁	屈 取 球	Qu Qu Qiu

(续)

采用的缩写字母	在钢号中位置	含义	缩写字母来源	
			汉字	拼音
q	尾	桥梁用钢	桥	Qiao
QG	中	电工用冷轧取向高磁感硅钢	取高	Qu Gao
QT	头	球墨铸铁	球铁	Qiu Tie
R	层	压力容器用钢	容	Rong
RT	头	耐热铸铁	热铁	Re Tie
S	头	管线用钢	—	
SM	头	塑料模具钢	塑模	Su Mu
T	头	碳素工具钢	碳	Tan
TL	头	脱碳低磷粒铁	脱练	Tuo Lian
TZ	尾	特殊镇静钢	特静	Te Zhen
U	头	钢轨钢	轨	Gui
W	中	电工用冷轧无取向硅钢片	无	Wu
Y	头	易切削钢	易	Yi
YF	头	易切削非调质钢	易非	Yi Fei
Z	尾	1. 镇静钢	镇	Zhen
	头	2. 铸造用生铁	铸	Zhu
ZG	头	铸钢	铸钢	Zhu Gang
ZU	头	轧辊用铸钢	铸辊	Zhu gun

表 3-3 产品名称、用途、特性和工艺方法命名符号 (GB/T221—2000)

名 称	采用的汉字和汉语拼音		采用符号	字体	位置
	汉字	汉语拼音			
甲类钢(普通碳素钢用)	氧	YANG	A	大写	牌号头
乙类钢(普通碳素钢用)			B	大写	牌号头
特类钢(普通碳素钢用)			C	大写	牌号头
氧气转炉(普通碳素钢用)			Y	大写	牌号中
碱性空气转炉(普通碳素钢用)	碱	JIAN	J	大写	牌号中
易切削钢	易	YI	Y	大写	牌号头
电工用热轧硅钢	电热	DIAN RE	DR	大写	牌号头
电工用冷轧无取向硅钢	电无	DIAN WU	DW	大写	牌号头
电工用冷轧取向硅钢	电取	DIAN QU	DQ	大写	牌号头
电工用纯铁	电铁	DIAN TIE	DT	大写	牌号头
碳素工具钢	碳	TAN	T	大写	牌号头
滚珠轴承钢	滚	GUN	G	大写	牌号头
焊接用钢	焊	HAN	H	大写	牌号头
钢轨钢	轨	GUI	U	大写	牌号头
地质钻探钢管用钢	地质	DI ZHI	DZ	大写	牌号尾

(续)

名 称	采用的汉字和汉语拼音		采用符号	字体	位置
	汉字	汉语拼音			
船用钢	船	CHUAN	C	大写	牌号尾
汽车大梁用钢	梁	LIANG	L	大写	牌号尾
压力容器用钢	容	RONG	R	大写	牌号尾
桥梁钢	桥	QIAO	q	小写	牌号尾
锅炉钢	锅	GUO	g	小写	牌号尾
精密合金	精	JING	J	大写	牌号中
变形高温合金	高合	GAO HE	GH	大写	牌号头
铸钢	铸钢	ZHU GANG	ZG	大写	牌号头
灰铸铁	灰铁	HUI TIE	HT	大写	牌号头
球墨铸铁	球铁	QIU TIE	QT	大写	牌号头
可锻铸铁	可铁	KE TIE	KT	大写	牌号头
沸腾钢	沸	FEI	F	大写	牌号头
半镇静钢	半	BAN	b	小写	牌号尾
高级	高	GAO	A	大写	牌号尾
特级	特	TE	E	大写	牌号尾
超级	超	CHAO	C	大写	牌号尾

3.2 国产铸铁牌号表示方法(表 3-4 ~ 表 3-5)

表 3-4 铸铁分类方法

分类方法	分类名称	说 明
按断口颜色不同而分	1. 灰铸铁	这种铸铁中的碳大部或全部以自由状态的片状石墨形式存在,其断口呈暗灰色,故称为灰铸铁。它有一定的力学性能和良好的被切削加工性,是工业上应用最普遍的一种铸铁
	2. 白口铸铁	白口铸铁是组织中完全没有或几乎完全没有石墨的一种铁碳合金,其中碳全部以渗碳体形式存在,断口呈白亮色,因而得名。这种铸铁硬而且脆,不能进行切削加工,工业上很少直接应用它来制作机械零件。在机械制造中,有时仅利用它来制作需要耐磨而不承受冲击载荷的机件。如拉丝板、球磨机的铁球等,或用激冷的办法制作内部为灰口铸铁组织,表层为白口铸铁组织的耐磨零件,如火车轮圈、轧辊、犁铧等。这种铸铁具有很高的表面硬度和耐磨性,通常又称为激冷铸铁或冷硬铸铁
	3. 麻口铸铁	这是介于白口铸铁和灰铸铁之间的一种铸铁,它的组织由珠光体 + 渗碳体 + 石墨组成。断口呈灰白相间的麻点状,故称麻口铸铁,这种铸铁性能不好,极少应用
按化学成分不同而分	1. 普通铸铁	普通铸铁是指不含任何合金元素的铸铁,一般常用的灰铸铁、可锻铸铁、激冷铸铁和球墨铸铁等,都属于这一类铸铁
	2. 合金铸铁	它是在普通铸铁内有意识地加入一些合金元素,借以提高铸铁某些特殊性能而配制成的一种高级铸铁,如各种耐蚀、耐热、耐磨的特殊性能铸铁,都属于这一类型的铸铁

(续)

分类方法	分类名称	说 明
按生产方法和组织性能的不同而分	1. 普通灰铸铁	(参见“灰铸铁”)
	2. 孕育铸铁	孕育铸铁又称变质铸铁,它是在灰铸铁的基础上,采用“变质处理”,即在铁液中加入少量的变质剂(硅铁或硅钙合金),造成人工晶核,使能获得细晶粒的珠光体和细片状石墨组织的一种高级铸铁。这种铸铁的强度、塑性和韧性均比一般灰铸铁要好得多,组织也较均匀一致,主要用来制造力学性能要求较高而截面尺寸变化较大的大型铸件
	3. 可锻铸铁	可锻铸铁是由一定成分的白口铸铁经石墨化退火后而成,其中碳大部或全部呈团絮状石墨的形式存在,由于其对基体的破坏作用,较之片状石墨大大减轻,因而比灰铸铁具有较高的韧性,故又称韧性铸铁。可锻铸铁实际并不可以锻造,只不过具有一定的塑性而已,通常多用来制造承受冲击载荷的铸件
	4. 球墨铸铁	球墨铸铁简称球铁。它是通过在浇注前往铁液中加入一定量的球化剂(如纯镁或其合金)和墨化剂(硅铁或硅钙合金),以促进碳呈球状石墨结晶而获得的。由于石墨呈球形,应力大为减轻,它主要减小金属基体的有效截面积,因而这种铸铁的力学性能比普通灰铸铁高得多,也比可锻铸铁好;此外,它还具有比灰铸铁好的焊接性和接受热处理的性能;和钢相比,除塑性、韧性稍低外,其他性能均接近,是一种同时兼有钢和铸铁优点的优良材料,因此在机械工程上获得了广泛的应用
	5. 特殊性能铸铁	这是一组具有某些特性的铸铁,根据用途的不同,可分为耐磨铸铁、耐热铸铁、耐蚀铸铁等等。这类铸铁大部分都属于合金铸铁,在机械制造上应用也较为广泛

铸铁牌号示例说明如下:

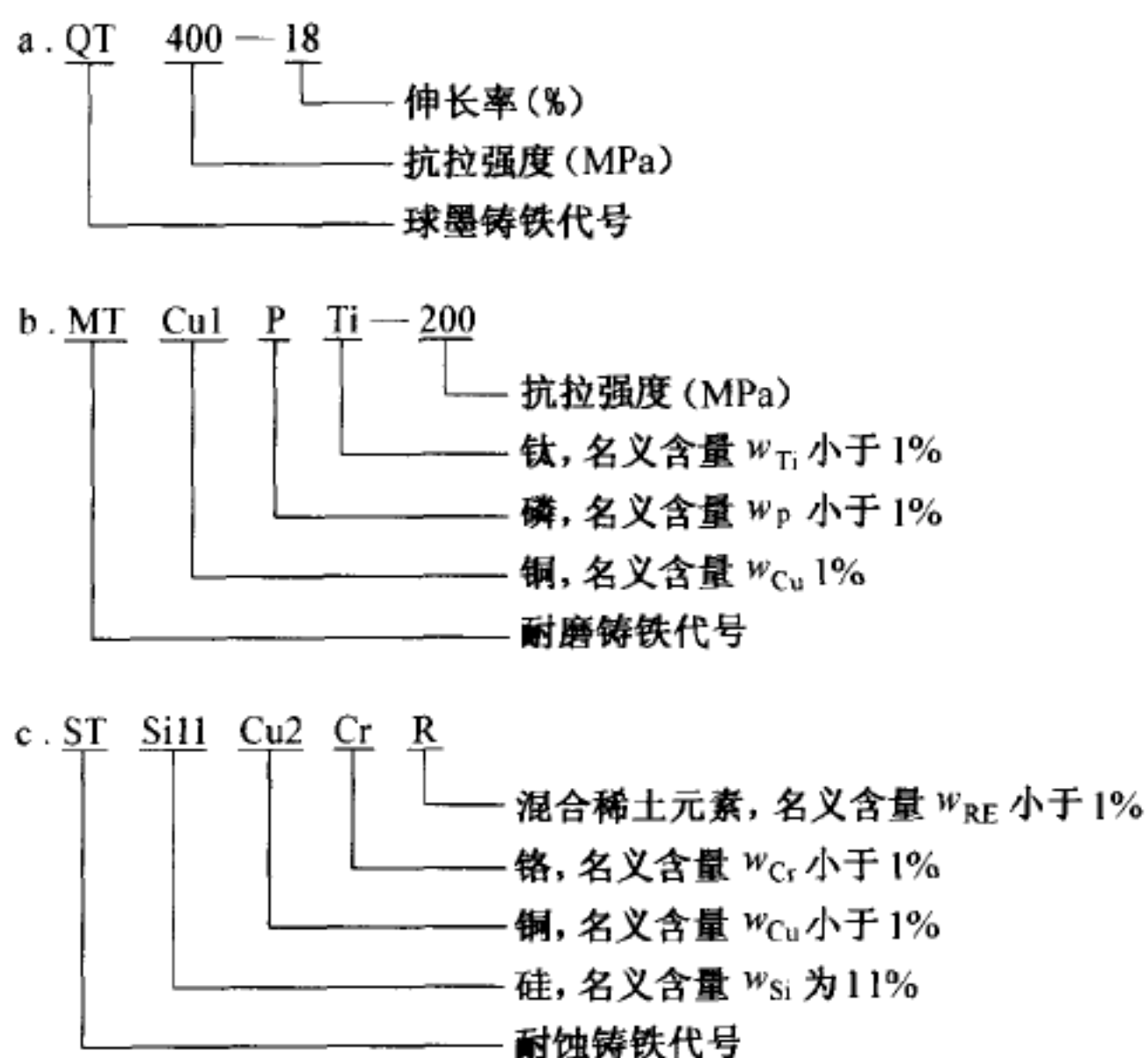


表 3-5 各种铸铁名称、代号及牌号表示方法实例表

铸铁名称	代号	牌号表示方法实例	铸铁名称	代号	牌号表示方法实例
灰铸铁	HT	HT100	抗磨白口铸铁	KmBT	KmBTMn5Mo2Cu
蠕墨铸铁	RuT	RuT400	抗磨球墨铸铁	KmQT	KmQTMn6
球墨铸铁	QT	QT400—17	冷硬铸铁	LT	LTCrMoR
黑心可锻铸铁 白心可锻铸铁 珠光体可锻铸铁	KHT	KHT300—06	耐蚀铸铁	ST	STSi15R
	KBT	KBT350—04	耐蚀球墨铸铁	SQT	SQTA15Si5
	KZT	KZT450—06	耐热铸铁	RT	RTCr2
耐磨铸铁	MT	MTCu1PTi—150	耐热球墨铸铁	RQT	RQTA 16
			奥氏体铸铁	AT	—

3.3 国产非铁金属和合金的代号及表示方法(表 3-6 ~ 表 3-9)

表 3-6 非铁金属及合金产品代号和表示方法

金属及其合金产品	代号		说明
纯金属冶炼产品	铜	Cu—1、Cu—2	用元素符号结合顺序号表示。随顺序号增大,工业纯度降低。高纯度金属随顺序号增大纯度提高,并在顺序号前加“0”
	铝	Al—1、Al—02	
	铅	Pb—1、Pb—2	
纯金属加工产品	铜	T1、T2	铜、铝、镍用汉语拼音字母加顺序号,其余均用元素符号加顺序号表示
	铝	L1、L2	
	镍	N2、N4	
	锌	Zn1、Zn2	
	铅	Pb1、Pb2	
合金加工产品	黄铜	H62、HPb59—1 HSn62—1、HMn57—3—1	一般用拼音字母“H”加铜含量表示,三元以上的黄铜加第二个主添加元素符号及除 Zn 以外的成分数字组
	青铜	QSn4—3、QAl10—2—1.5 QSi1—3	用拼音字母 Q 加第一个主添加元素符号及除基元素铜外的成分数字组
	白铜	B16、BMn3—12	用“B”加 Ni 含量、三元以上的加第二个添加元素符号及成分数字组
	镍合金	NCr9、NMn2—2—1	用“N”加第一个主添加元素符号及除基元素 Ni 之外的成分数字组
	铝合金	LY1、LF2	用汉语拼音字母加顺序号
	镁合金	MB1、MB2	
	铅合金	PbSn2	铅、锌、贵金属及稀有金属等合金用基元素符号加第一主添加元素符号及除基元素外的成分数字组
	锌合金	ZnAl10—2	
	银合金	AgCu4	
	金合金	AuNi7.5—1.5	
	中间合金	CuSi25	

(续)

金属及其合金产品	代号		说明
专用合金	轴承合金	ChSnSb11—6 ChPbSb0.25	按拼音字母加二个基元素符号及除第一个基元素外的成分数字组
	印刷合金	1PbSb14—4	
	焊料	H1CuZn64 H1AgCu20—15	
产品状态代号表示方法		LF1—M QBe2—Y	用拼音字母相应加于产品代号之后,并于中间划一横道

表 3-7 铸造非铁合金代号表示方法

合金名称	代号	说明
铸造铝合金	ZL101 ZL201 ZL301 ZL401	简称铸铝,以 ZL 表示,后面第一位数字表示类别,1 为 AlSi 系、2 为 AlCu 系、3 为 AlMg 系、4 为 AlZn 系、二、三位数字是顺序号
铸造镁合金	ZM1 ZM5	简称铸镁、以 ZM 表示,后面的数字为顺序号
铸造铜合金	ZHPb59—1 ZQSn5—5—5	类似铜合金加工产品代号,在代号前加符号“Z”
铸造锌合金	ZZnAl4—1	类似锌合金加工产品代号,在代号前加符号“Z”
铸造轴承合金	ZChSnSb4—4 (或 ZChSn4) ZChPbSb15—10 (或 ZChPb3)	“Z”表示铸造,Ch 为轴字拼音第一音节。第一个元素符号为合金的基础元素,第二个为主要添加元素,其后为该合金成分

注:铸造方法代号 S—砂型、J—金属型、Y—压力铸造、B—变质处理。

表 3-8 非铁金属产品状态名称及其代号

名称	代号	名称	代号
退火	M	优质表面(淬火)	CO
淬火	C	加厚包铝的	J
淬火(自然时效)	CZ	不包铝的	B
淬火(人工时效)	CS	不包铝(热轧)	BR
硬	Y	不包铝(退火)	BM
3/4 硬、1/2 硬、1/3 硬、1/4 硬	Y1、Y2、Y3、Y4	不包铝(淬火、冷作硬化)	BCY
特硬	T	不包铝(淬火、表面优质)	BCO
热轧、热挤	R	不包铝(淬火、冷作硬化、表面优质)	BCYO
优质表面	O	淬火、自然时效、冷作硬化、表面优质	CZY0
优质表面(退火)	MO		

表 3-9 非铁金属合金热处理状态代号

代号	热处理状态	代号	热处理状态
T1	人工时效	T6	淬火加完全人工时效
T2	退火	T7	淬火加稳定化回火
T4	淬火	T8	淬火加软化回火
T5	淬火加部分人工时效		

3.4 国家名称代号和标准名称代号(表 3-10 ~ 表 3-11)

表 3-10 国家名称、代号

国家名称	代号	国家名称	代号	国家名称	代号	国家名称	代号
中国 China	CN	英国 United Kingdom	GB	巴西 Brazil	BR	波兰 Poland	PL
奥地利 Austria	AT	匈牙利 Hungary	HU	加拿大 Canada	CA	罗马尼亚 Romania	RO
澳大利亚 Australia	AU	印度 India	IN	瑞士 Switzerland	CH	瑞典 Sweden	SE
比利时 Belgium	BE	意大利 Italy	IT	德国 Federal Republic of Germany	DE	俄罗斯 U.S.S.R	SU
保加利亚 Bulgaria	BG	日本 Japan	JP	荷兰 Netherlands	NL	美国 United States	US
西班牙 Spain	ES	韩国 South Korea	KP	挪威 Norway	NO	南斯拉夫 Yugoslavia	YU
法国 France	FR	墨西哥 Mexico	MX				

表 3-11 世界各国标准名称、代号

代号	标准级别名称	代号	标准级别名称
GB	(中国)国家标准	BS·AIR - M	英国标准航空材料
GBn	(中国)国家标准(内部发行)	DD	英国标准协会标准
JB	(中国)原机械工业部标准	LR	英国劳氏船级社标准
YB	(中国)冶金工业部标准	DTD	英国宇航材料与加工方法标准
HBW	(中国)原航空工业部标准	DIN	德国标准
NJ	(中国)农机标准	GL	德国劳氏船级社(标准)
JB/Z	(中国)原机械工业部指导性技术文件	SEW	德国钢铁工程师协会钢铁材料标准
YB/Z	(中国)冶金工业部指导性技术文件	VDEh	德国钢铁工程师协会
YB/T	(中国)冶金工业部推荐标准	VDE	德国电器工程师协会标准
ZB	(中国)专业标准	VDI	德国工程师协会标准
ASA	美国国家标准(1969年前)	VDS	德国焊接协会技术标准
SAE	美国机动车工程师协会标准	VDMA	德国机械制造商联合会标准
UNS	美国金属与合金数字代号推荐办法(由 SAE 和 ASTM 共同制定)	JIS	日本工业标准
UL	美国保险商试验所标准	ANSI	美国国家标准(1970年后)
ISO	国际标准化组织	ABS	美国船级社(标准)
ISO/RISO	国际标准化组织推荐标准	ACI	美国合金铸造学会(标准)
ISO/DIS	国际标准草案	AISI	美国钢铁学会(标准)
IEC	国际电工委员会	AMS	宇宙航空材料标准(美国)
BS	英国标准	ASM	美国金属学会(标准)
		API	美国石油学会(标准)

(续)

代号	标准级别名称	代号	标准级别名称
ASTM	美国材料与试验学会(标准)	NV	挪威船级社标准
AWS	美国焊接学会标准	ONORM	奥地利标准
NEMA	美国全国电气制造商协会标准	UNI	意大利标准
MIL	美国军用标准	VSM	瑞士制造商协会标准
JASO	日本汽车标准	KS	韩国标准
NDS	(日本)防卫厅标准	KR	韩国船级社标准
NK	日本海事协会(船级社)(标准)	IS	印度标准
JHS	日本金属热处理工业协会标准	UNE	西班牙标准
NF	法国标准	ГОСТ	俄罗斯国家标准
BV	法国船级社标准	JUS	南斯拉夫标准
CSA	加拿大标准	MSZ	匈牙利国家标准
AS	澳大利亚(标准)	PN	波兰标准
DGN	墨西哥标准总局标准(墨西哥标准)	STAS	罗马尼亚标准
SIS	瑞典标准		

3.5 法国 NF 标准钢号表示方法

NF 是法国标准(Normes Francaises)的标准代号, NF 标准是由法国标准化协会(AFNOR—Association Francaise de Normalisation)发布的。

1. NF 标准中钢铁产品系列

有关钢铁产品的技术标准大多编在 NF A × × —— × × × 系列, 少数编在 NF C × × —— × × × 系列, 举例如下:

NF A32——铸铁、铸钢件

A33——非合金钢等钢种

A35——热轧棒材和型钢(有关尺寸规定见 A45 系列)

A36——热轧和冷轧板带(有关尺寸规定见 A46 系列)

A37——冷轧、冷拉棒材和冷弯型钢(有关尺寸规定见 47 系列)

A40——产品形状与尺寸分类

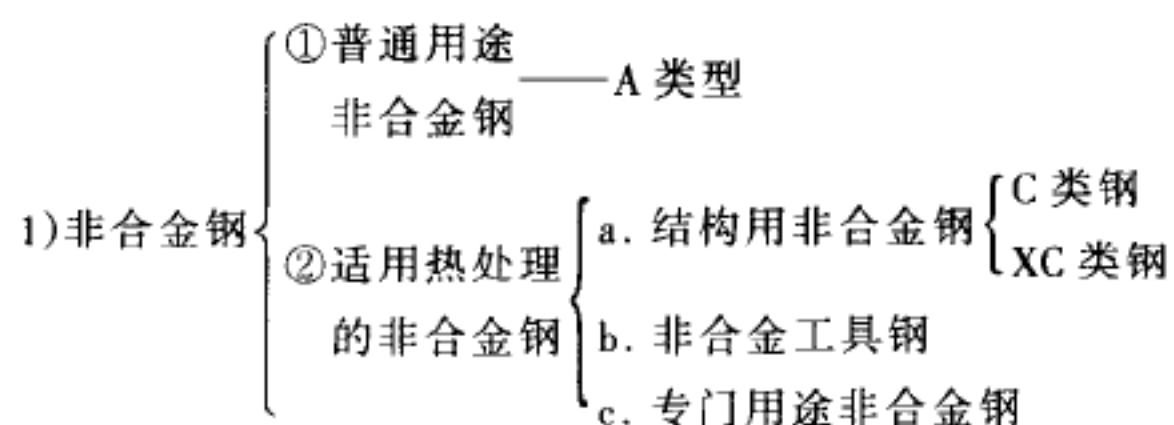
A48——铸管

A49——钢管

C28——磁性材料

2. 钢的分类体系

NF 标准的钢号表示方法, 是以它的钢铁分类体系为依据的。钢的分类体系如下:



2)合金钢 { ①高强度 ——— A 类钢
低合金钢
②适用热处理 { a. 结构用合金钢
的合金钢 { b. 高合金钢

3.NF 钢号合金元素表示方法(表 3-12)

表 3-12 钢号中表示合金元素的法文字母和含量乘数

元素名称及化学符号	钢号中采用的字母	乘数	元素名称及化学符号	钢号中采用的字母	乘数
铬 Cr	C	4	钼 Mo	D	10
钴 Co	K	4	铌 Nb	Nb	10
锰 Mn	M	4	铅 Pb	Pb	10
镍 Ni	N	4	铌 Ta	Ta	10
硅 Si	S	4	钛 Ti	T	10
钨 W	W	4 ^①	钒 V	V	10
铝 Al	A	10	锆 Zr	Zr	10
铍 Be	Be	10	氮 N	Az	100
铜 Cu	U	10	硼 B	B	1000

① 旧标准中 W 的乘数为 10。

4.NF 标准钢号分类表示方法(表 3-13)

表 3-13 法国 NF 标准钢号分类表示方法

类别	符号	旧钢号表示方法	符号数字含义	新钢号表示方法	附注
普通用途非合金钢	A	A33、A37、A42、A52	抗拉强度下限值,单位是 kgf/mm ²	S × × ×、后三位数字表示屈服强度下限值(MPa)	
高强度低合金钢	A	A510、A530、A550、A590	抗拉强度下限值(MPa)	P × × ×,P 表示压力容器用钢,三位数字表示屈服强度下限(MPa)	
结构用非合金钢	C	C10、C12、C20、C30 ~ C45...C75	数字表示平均 $w_C\% \times 100$ 、 $w_{(P,S)} \leq 0.040\%$ 的优质碳素钢	—	
	XC	XC10、XC12、X12 ... XC85、XC100	数字表示平均 $w_C\% \times 100$ 、 $w_{P,S} \leq 0.035\%$,比 C 类钢严格	—	
结构用合金钢		18NCD6、38MB5	开头数字表示 $w_C\% \times 100$,符号表示合金元素代号、其后数字等于元素百分含量的 4 倍乘以 100	—	
易切削钢		原 NF 标准 NFA35-561(1992)、NFA35-562(1986)	铅易切削钢,如 AD37Pb,数字表示抗拉强度下限 $\leq 360\text{MPa}$ 。硫易切钢如 S250Pb,数字为硫含量下限 [$w_S 0.25\% \sim 0.032\%$]。硫锰易切钢,如 35MF6,前数字为平均 $w_C(0.33\% \sim 0.39\%) \times 100$; M 为 Mn、F 为易切钢符号,数字 6 是 Mn 含量下限乘以 $4w_{Mn} 1.5(\%) \times 4 = 6$	新标准 NFEN10087(1998),如 35S20 硫锰易切钢 11SMn30 硫锰铅易切钢,如 38SMnPb28 前数字为平均 $w_C\% \times 100$ 、后数字为硫平均 $w_S\% \times 100$	

(续)

类别	符号	旧钢号表示方法	符号数字含义	新钢号表示方法	附注
弹簧钢	R	旧标准 NFA35-571 (1984) 有两个钢号: RE375、RH388	非合金弹簧钢: RE375、RH388, R 表示弹簧钢, 数字表示强度等级和用途, 合金弹簧钢按化学成分表示	NF 新标准 (1996) 只有 1 个钢号: C42, 数字表示平均 $w_C \% \times 100$	
轴承钢		如 100CM6, 20NCD7、Z85WDCV6	用法文元素字母表示合金元素, 开头数字为 $w_C \% \times 100$, 后面数字是开头元素含量 $\% \times 100 \times 4$	采用欧洲标准 EN, 元素符号用国际化学元素符号表示, 如 100CrMn6, 20NiGMo7。不锈钢和高温轴承钢同高合金钢, 如 X85WMoGV6-5-4 前数字是平均 w_C , 后面数字是 W、Mo、C 平均含量, Z 改 X、元素符号改国际化学元素符号	
高合金钢	Z	如超低碳不锈钢 Z3CNDU22-07Az 耐热钢 210CNWT17-13B	Z 是钢类型符号, 3 为平均含碳量 $w_C \% \times 100$, CNDU 分别为 Cr、Ni、Mo、Cu, 22 和 7 是 Cr、Ni 平均含量(%), Az 是 N		
非合金工具钢	Y	按 NFA35-590 (1992) 标准, 如 Y ₁ 70、Y ₁ 80、Y ₁ 90、Y ₁ 105、Y ₁ 105Y、Y ₂ 120、Y ₂ 120C、Y ₂ 140、Y ₃ 38、Y ₃ 42、Y ₃ 48、Y ₃ 55、Y ₃ 65		新钢号通式为 C × × × EXU □ ×, EN 标准把前列旧钢号相应改为 C70E2U、C120E3UCr4, C 表示优质碳素钢, 随后 2 位或 3 位数字为平均含碳量 $\% \times 100$, EXU 为硫磷含量等级如 E2U 为 w_P 、 w_S 各 $\leq 0.20\%$, E3U- w_P 、 w_S 各 $\leq 0.025\%$, Cr4 平均含 $w_{Cr} 0.4\%$	
合金工具钢		合金元素 $< 5\%$ 时, 如 Y42CD4, 合金元素 $> 5\%$ 时, 如 Z2NKDT18-08-05		EN 标准合金元素 $< 5\%$ 时, Y42CD4 改为 42CrMo4, 合金元素 $> 5\%$ 时, Z2NKDT18-08-05 改为 X2NiCoMoTi18-8-5	
高速工具钢		旧钢号基本按 NF 高合金钢钢号表示, 如 Z70WDCV06-05-0.4-0.2、Z80WCV18-04-01		EN 标准相应为: HS6-5-4-2, HS18-4-1	

(续)

类别	符号	旧钢号表示方法	符号数字含义	新钢号表示方法	附注
硅钢		例如 FeM140-305、 FeM117-30P、FeV1000- 65HD	由前缀字母 + 铁损数字 + 厚度 数字 + 后缀字母构成, 钢号通式 为 $00 \times \times \times - \times \times 0$ 。FeM 表示 取向硅钢、FeN 是无取向硅钢、 N—一般铁损值, S—较低铁损 值、HD—非合金钢无取向(半成品) HE—合金钢无取向(半成品)		
其他钢材		NF 标准: 钢管 TU—无缝管, TS—焊 管; 钢板 PF—近海结 构用钢板, P—压力容 器用扁平产品, BS— 焊接气瓶用钢板, 锻 件前缀字母 F—一般 用途锻件	—	—	
铸钢		NF 标准: 基本钢号加 后缀字母 M、合金铸 钢和不锈钢耐热铸钢以 化学成分表示	如 A420CP—M 表示抗拉强度 $\geq 420\text{MPa}$ 的锅炉与压力容器用 非合金铸钢, 合金铸钢如 15CD5.05—M, 15 为平均含碳量 $w_C 0.15(\%) \times 100$, CD—Cr, Mo w_C 1.25% ($5 \div 4 = 1.25$), w (Mo) 0.5% (不用乘数), M—铸钢牌 号, 不 锈 耐 热 铸 钢 如 Z4CND19.13—M, 平均 $w_C 0.04\%$ 、 CND—Cr、Ni、Mo, 平均含 w_C 19%、平均含钼 $w_{Mo} 13\%$, M—铸 钢牌号	新牌号为基本钢号加前缀 G, 如 GE230 是屈服强度 $\geq 230\text{MPa}$ 的非合金铸钢 G25CrMo4 为平均 $w_C 0.25\%$ 平均 $w_C 1.0\%$ ($4 \div 4 =$ 1) 的合金铸钢, GX2CrNi19-11 为 $w_C \leq 0.030\%$, 平均 $w_C 19\%$ 、平 均 $w_{Ni} 11\%$ 的低碳不锈钢铸钢	

3.6 德国 DIN 标准钢号表示方法

DIN 是德国工业标准(Deutsche Industria Norm)的标准代号。关于 DIN 标准钢号表示方法有 DIN 17006 系统和 DIN 17007 系统两种。

1. DIN17006 系统钢号表示方法

该系统的钢号是由三部分组成: ①表示钢的强度或化学成分的主体部分; ②冠在主体前面表示冶炼或原始特性的缩写字母; ③附在主体后面的代表保证范围的数字和处理状态的缩写字母。上述的主体部分以及所采用的字母和数字的含义见表 3-14。

表 3-14 DIN17006 系统钢号的主体部分以及所采用的字母和数字的含义

熔炼方法 (代表字母)	原始特征 (代表字母)	主体部分	保证范围 (代表字母)	处理状态 (代表字母)
B—贝氏炉钢 E—电炉钢(一般的) F—反射炉钢 I—感应电炉钢 LE—电弧炉钢 PP—熟铁 SS—焊接用钢 T—托马斯钢 TI—坩埚钢 W—转炉钢 Y—氧气转炉钢 附加字母: B—碱性 Y—酸性	A—抗时效的 G—含较高的磷和(或)硫 H—半镇静钢 K—含较低的磷和(或)硫 L—抗碱脆的 P—可压焊的(可锻焊的) Q—可冷锻的(可挤压的,可冷变形的) R—镇静钢 S—可熔焊的 U—沸腾钢 Z—可拉拔的	① 按照材料强度表示: 主体符号“St”抗拉强度下限 ② 按照化学成分表示: 碳素符号 碳含量 合金元素符号 合金含量 或 前置字母 X 碳含量 合金元素符号合金含量	1—屈服点 2—弯曲或顶锻试验 3—冲击韧度 4—屈服点和弯曲或顶锻试验 5—弯曲或顶锻试验及冲击韧度 6—屈服点及冲击韧度 7—屈服点和弯曲或顶锻试验及冲击韧度 8—高温强度或蠕变强度 9—电气特性或磁性 无数字—弯曲或顶锻试验(每炉一个试样)	A—经回火 B—经处理获得最佳可切削性 E—经渗碳淬火 G—经软化退火 H—经淬火 HF—经表面火焰淬火 HI—经表面高频感应淬火 K—经冷加工(如冷轧、冷拉等) N—经正火 NT—经渗氮 S—经消除应力退火 U—未经处理 V—经调质

DIN17006 系统的钢号分为按照材料强度和按照化学成分来表示两种。按照材料强度的钢号表示法列于表 3-15。按化学成分的表示方法列于表 3-16。按材料强度的表示方法仅适用于非合金钢。按化学成分的表示方法对非合金钢、合金钢和高合金钢都适用。

表 3-15 按材料强度的钢号表示法

钢号举例	标准	代号和数字说明
St33、USt37 RSt37、QSt37-3U	DIN 老标准	St 代表钢(Stahl), 随后数字为抗拉强度(kgf/mm ²)下限, USt—沸腾钢、RSt—镇静钢, QSt—可冷锻钢、-3 表示保证冲击韧度, U—未经热处理
S × × ×	欧洲标准 EN10025—1994 (在德国也通用)	字母 S(钢)后面的 3 位数表示屈服强度(MPa)

表 3-16 按化学成分的钢号表示方法

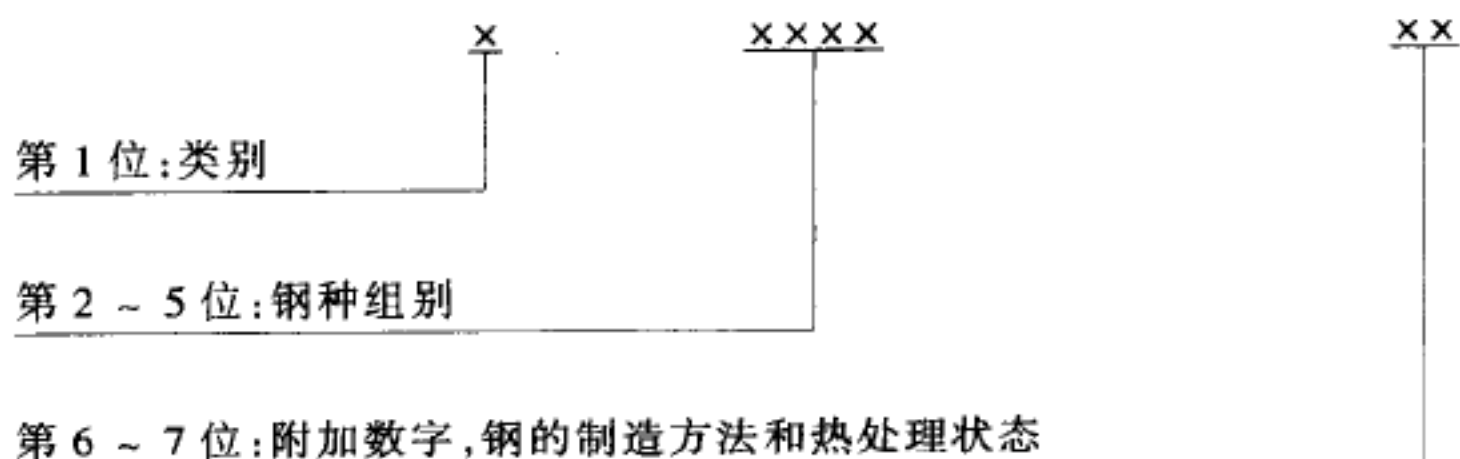
钢类型	钢号举例	符号及数字说明	备注
非合金钢	C15	平均含碳量 $w_C = 0.15\%$ 的渗碳钢	使用碳素钢时, 当钢的其他性能比抗拉强度更重要或钢材需用户自行处理时才采用
	C35N	平均 $w_C = 0.35\%$ 的调质钢, N—经正火的	
	C × ×	钢中 $w_P, w_S \leq 0.045\%$, 数字 × × 为 $w_P, w_S \% \times 100$	
	Ck × ×	控制 S、P 含量的优质钢	
	Cm × ×	控制 w_S 的优质钢, 钢中 $w_S = 0.020\% \sim 0.035\%$	
	Cf × ×	表面淬火用钢	
	Cq × ×	冷锻用钢	

(续)

钢类型	钢号举例	符号及数字说明	备注
低合金钢 和合金钢	13Cr2	平均 $w_C = 0.13\%$, 平均含铬 $(2 \div 4)\% = w_{Cr} 0.5\%$ 的钢	合金元素含量数值表示方法: Cr、Co、Mn、Ni、Si、W 的平均含量% 乘以 4; Al、Be、Cu、Mo、Nb、Pb、Ta、Ti、V、Zr 乘以 10; Ce、N、P、S 乘以 100; B 乘以 1000
	25CrMo4	平均 $w_C = 0.25\%$, 平均含铬 $(4 \div 4)\% = w_{Cr} 1\%$, 还含钼的 Cr-Mo 钢	
	13Cr2E	平均 $w_C = 0.13\%$, 平均含铬 $w_{Cr} = 0.5\%$ 经渗碳淬火钢	
	25CrMo4V	平均 $w_C = 0.25\%$, 平均含铬 $w_{Cr} = 1\%$, 并含钒、钒、经调质处理的	
高合金钢	X10CrNi18-8	含 $w_C 0.10\%$, $w_{Cr} 18\%$, $w_{Ni} 8\%$ 的不锈钢	钢中一种元素在 5% 以上者称高合金钢, 钢号冠以字母 X
	X10CrNiTi-18-9-2	含 $w_C 0.10\%$, $w_{Cr} 18\%$, $w_{Ni} 9\%$, $w_{Ti} 2\%$ 的不锈钢	
碳素工具钢	C × × + W × (DIN)	C × × 表示平均含碳量万分之几的数字, W 表示工具钢, W 后的数字表示质量等级, 例如 W1、W2、W3 为 1、2、3 级质量, Ws 表示特殊质量和用途	
	C × × U (ISO)	国际标准化组织 (ISO) 钢号, 与 DIN 通用, 如 C80W1 亦可表示为 C80U	
高速工具钢	S × - × - × - × (DIN)	S 后面的数字依 W-Mo-V-Co 顺序表示, 其中无铬的数字, 元素含量以百分数示出, 不含 Mo 钢, Mo 处写“0”, 不含 Co 钢, 舍去 Co 数字	
	HS × - × - × - × (EN 标准)	HS 后合金元素含量数字顺序与 DIN 标准相同	
非合金铸钢	GSK- × ×, GSZ- × ×	GS—铸钢, K—钢模浇注, Z—离心浇注、后面的数字是抗拉强度 (kgf/mm^2)	按强度表示
合金铸钢	GS-15Cr3E	含 $w_C 0.15\%$, $w_{Cr} 0.75\%$ 、经渗碳淬火	按成分表示
	GS-25CrMo56V + 565	含 $w_C 0.25\%$, $w_{Cr} 1.2\%$, $w_{Mo} 0.6\%$, 经调质达 650MPa 抗拉强度经消除应力退火的钢	

2. DIN 17007 系统的数字钢号表示方法

材料号 (W-Nr) 系由 7 位数字组成, 数字所表示的含义如下:



材料号第 1 位数字中: 0—生铁和铁合金; 1—钢和铸钢; 2—重金属 (除钢铁外); 3—轻金属; 4~8—非金属材料。

在钢和铸钢的材料号中, 其中最主要的是第 2 位和第 3 位数字, 表示钢种组, 其中:

00~06—碳素钢, 其中“01”的大部分钢种, 现已并入“00”组。

90~96—碳素钢的专用钢。

07 和 97—硫、磷含量较高的易切削钢。

08 ~ 09 }
98 ~ 99 } —硅、锰含量较高的钢。其中“08”的大部分钢种, 现已并入“04”和“05”组; “09”的一

部分钢种, 现已并入“06”组。

10—特殊物理性能的碳素钢及电工纯铁。

11 ~ 12—优质碳素结构钢。

15 ~ 18—碳素工具钢。

20 ~ 28—合金工具钢(包括铸钢)。

32 ~ 33—高速工具钢。

34 ~ 35—耐磨钢和轴承钢。

36 ~ 39—具有特殊物理性能的材料(包括磁性材料)。

40 ~ 45—不锈钢。

47 ~ 48 和 49—耐热钢和高温材料。

50 ~ 85—合金结构钢。

88—硬质合金。

此外, 尚有一些数字如“13”、“14”、“55”、“64”等, 是暂予保留的, 以便今后用于新发展的材料。

材料号第 4 位和第 5 位数字无一定规律, 或按其碳含量或按合金含量区分。

材料号第 6 位和第 7 位数字为附加数字, 一般在标准中不予标出, 但亦常用。第 6 位数字用以表示钢的冶炼和浇注工艺; 第 7 位数字用以表示热处理状态, 它们的具体含义见表 3-17。

表 3-17 材料号中附加数字——第 6 位和第 7 位数字的含义

第 6 位数字	具体含义	第 7 位数字	具体含义
0	不定的或不重要的	0	不经处理或自由处理(在变形加工后, 不希望或不保证进行热处理)
1	碱性转炉沸腾钢	1	正火
2	碱性转炉镇静钢	2	软化退火
3	特殊冶炼法沸腾钢	3	热处理后具有良好的切削加工性
4	特殊冶炼法镇静钢	4	韧性调质
5	平炉沸腾钢	5	调质
6	平炉镇静钢	6	硬性调质
7	氧气吹炼沸腾钢	7	冷变形
8	氧气吹炼镇静钢	8	弹簧硬化冷变形
9	电炉钢	9	根据特殊规定的处理

3.7 美国 AISI 和 SAE 标准钢号表示方法

美国从事标准化工作的团体有数百个, 而与金属材料有关的著名标准化机构也有 10 余个, 其中包括合金铸造学会(ACI)、钢铁学会(AISI)、国家标准学会(ANSI)、金属学会(ASM), 机械工程师协会(ASME), 材料与试验协会(ASTM)、汽车工程师协会(SAE)等。这些团体都有自己的材料标准和牌号系统, 由于历史原因很难统一, 但最常用的是 AISI 和 SAE 标准的钢铁材料表示方法。

两个标准按结构钢、轴承钢、保证淬透性钢(H钢)、工具钢、不锈钢和耐热钢进行分类和命名牌号。

1. 结构钢

AISI 和 SAE 的钢号表示方法大致相同,只是钢号前缀符号的差别。表 3-18 所列为 SAE 的结构钢钢号系统。

表 3-18 SAE 标准的结构钢钢号系统

数字系统	钢组分类
00 × ×	碳素或低合金铸钢
01 × ×	高强度铸钢
10 × ×	碳素钢 [$w_{Mn} \leq 1.0$]
11 × ×	含硫易切削钢
12 × ×	含硫和含硫磷易切削钢
13 × ×	锰钢 [$w_{Mn} 1.75$]
15 × ×	较高含锰量碳素钢
23 × ×	镍钢 [$w_{Ni} 3.5$]
25 × ×	镍钢 [$w_{Ni} 5$]
31 × ×	镍铬钢 [$w_{Ni} 1.25, w_{Cr} 0.65/0.8$]
32 × ×	镍铬钢 [$w_{Ni} 1.75, w_{Cr} 1.07$]
33 × ×	镍铬钢 [$w_{Ni} 3.5, w_{Cr} 1.50/1.57$]
34 × ×	镍铬钢 [$w_{Ni} 3.0, w_{Cr} 0.77$]
40 × ×	钼钢 [$w_{Mo} 0.2/0.25$]
41 × ×	铬钼钢 [$w_{Cr} 0.5/0.8/0.95, w_{Mo} 0.12/0.2/0.25/0.30$]
43 × ×	镍铬钼钢 [$w_{Ni} 1.82, w_{Cr} 0.5/0.8, w_{Mo} 0.25$]
43BV × ×	镍铬钼钢,含硼和钒
44 × ×	钼钢 [$w_{Mo} 0.4/0.52$]
46 × ×	镍钼钢 [$w_{Ni} 0.85/1.82, w_{Mo} 0.2/0.25$]
47 × ×	铬镍钼钢 [$w_{Ni} 1.05, w_{Cr} 0.45, w_{Mo} 0.2/0.35$]
48 × ×	镍钼钢 [$w_{Ni} 3.5, w_{Mo} 0.25$]
50 × ×	铬钢 [$w_{Cr} 0.27 \sim 0.65$]
51 × ×	铬钢 [$w_{Cr} 0.8 \sim 1.05$]
61 × ×	铬钒钢
71 × ×	钨铬钢 [$w_W 3.5/1.65, w_{Cr} 3.5$]
72 × ×	钨铬钢 [$w_W 1.75, w_{Cr} 0.75$]
81 × ×	镍铬钼钢 [$w_{Ni} 0.3, w_{Cr} 0.4, w_{Mo} 0.12$]
86 × ×	镍铬钼钢 [$w_{Ni} 0.5, w_{Cr} 0.5, w_{Mo} 0.20$]
87 × ×	镍铬钼钢 [$w_{Ni} 0.55, w_{Cr} 0.5, w_{Mo} 0.25$]
88 × ×	镍铬钼钢 [$w_{Ni} 0.55, w_{Cr} 0.5, w_{Mo} 0.35$]
92 × ×	硅锰钢
93 × ×	镍铬钼钢 [$w_{Ni} 3.25, w_{Cr} 1.2, w_{Mo} 0.12$]
94 × ×	镍铬钼钢 [$w_{Ni} 0.45, w_{Cr} 0.4, w_{Mo} 0.12$]
97 × ×	镍铬钼钢 [$w_{Ni} 0.55, w_{Cr} 0.2, w_{Mo} 0.20$]
98 × ×	镍铬钼钢 [$w_{Ni} 1.0, w_{Cr} 0.8, w_{Mo} 0.25$]

注:1. 括号内系合金元素平均含量(质量百分数)。

2. 有时在 4 位数字中间插入字母“B”或“L”、有些钢号最后标以“LC”,如 × × B × × 为含硼钢种,如 50B46; × × L × ×, 含铅钢种,如 12L14; × × × × LC 为超低碳钢种 $w_C \leq 0.03\%$ 。

AISI 标准采用 4 位数字系列,编号和 SAE 相同,差别之处列于表 3-19。

表 3-19 AISI 标准钢号表示方法与 SAE 标准的区别

AISI 钢号的前缀字母	AISI 标准的特有钢号
C 碳素钢	28 × × 含 w_{Ni} 8.50% ~ 9.50% 的镍钢
B 贝氏炉钢	83 × × 含 w_{Mn} 1.30% ~ 1.60%、 w_{Mo} 0.20% ~ 0.30% 的锰钼钢
E 电炉钢	99 × × 含 w_{Ni} 1.00% ~ 1.30%、 w_{Cr} 0.4% ~ 0.60%、 w_{Mo} 0.20% ~ 0.30% 的镍铬钼钢
F 易切削钢	

2. 轴承钢

AISI 和 SAE 标准的高碳铬轴承钢系列列于表 3-20。

表 3-20 AISI 和 SAE 标准高碳铬轴承钢系列

钢种类别	AISI	SAE	说 明
低铬轴承钢	E50100	50100	钢号由 5 位数字组成、第 1 位数字 5 表示铬钢；第 2 位表示含铬量：0— w_{Cr} 0.5%，1— w_{Cr} 1.0%；2— w_{Cr} 1.45%；第 3、4、5 位表示平均含碳量 $w_C \% \times 100$
中铬轴承钢	E51100	51100	
高铬轴承钢	E52100	52100	

保证淬透性钢

保证淬透性结构钢在钢号后加“H”(Hardenability)。

3. 工具钢

AISI、SAE 和 ASTM 标准工具钢采用同一钢号系统。其种类代号列于表 3-21。

表 3-21 AISI—SAE 标准工具钢分类代号

钢号系列	工具钢类别	说 明
W ×	水淬工具钢	含少量 Cr、V、x 为顺序数字
S ×	耐冲击工具钢	
O ×	油淬火冷作工具钢	
A ×	空冷硬化冷作工具钢	
D ×	高碳高铬型热作工具钢	
H1 ×	中碳高铬型热作模具钢	
H2 ×	钨系热作模具钢	
H4 ×	钼系热作模具钢	
T ×	钨系高速工具钢	
M ×	钼系高速工具钢	
L ×	低合金特种用途工具钢	
F ×	碳钨工具钢	
P ×	低碳型工具钢，包括塑料模具用钢	

4. 不锈钢和耐热钢(表 3-22)

表 3-22 AISI 和 SAE 标准不锈、耐热钢钢号表示方法

加工工艺	AISI 标准	说 明	SAE 标准	说 明
锻 钢	2 × × 铬锰镍氮奥氏体钢	第 1 位数字—类型, 2、3 位—序号	302 × × 铬锰镍奥氏体钢	前 3 位数字表示类型, 后 2 位数表示顺序
	3 × × 镍铬奥氏体钢		303 × × 镍铬奥氏体钢	
	4 × × 高铬马氏体钢和低 碳高铬铁素体钢		514 × × 高铬马氏体和低 碳高铬铁素体钢	
	5 × × 低铬马氏体钢		515 × × 低铬马氏体钢	
	6 × × 耐热钢和镍基耐热 合金	其中 63 × 为沉淀硬化不 锈钢		
铸 钢			60 × × × ≤ 650℃ 用的耐 热钢	后 3 位数字与 AI- SI 相同的数字
			70 × × × > 650℃ 用的耐 热钢	

3.8 日本 JIS 标准钢号表示方法

1. 概述

JIS 是日本工业标准(Japanese Industrial Standard)的缩写, JIS 钢铁材料规格分为铁、钢和钢材三类。钢分为普通钢、特殊钢和铸锻钢三类。特殊钢又分为结构钢、工具钢、特殊用途钢等。钢材按形状分为条钢、厚板、薄板、钢管、线材和钢丝等。

JIS 标准不仅表示钢的种类, 还表示钢材种类、有的还表示用途。钢号大多用英文字母, 少数用假名(日文字母)拼音和罗马字。钢号主体由三部分组成: 前缀字母表示分类(表 3-23), 第 2 部分英文字母或假名拼音罗马字表示用途、钢材种类及铸锻件制品(见表 3-34 和表 3-25), 第 3 部分数字表示钢种类或钢材序号或强度值下限。在钢号主体 1、2、3 部分之后, 按需要可附加表示钢材形状, 制造方法及热处理方式的后缀(见表 3-26)。

表 3-23 JIS 标准材料分类表示方法

	符号	材 料 分 类
常规	S	钢(Steel)
	F	铁(ferrum)
	M	磁性材料或纯金属(Magnet, metallic)
例外	SP	镜铁(spiegeleisen)
	S × ×	表示硅钢片(silicon)
	SiMn	表示硅锰合金(silicon-manganese)

表 3-24 JIS 用英文字母、假名拼音罗马字表示用途, 钢类及铸锻制品的第二位字母

字 母	分 类	字 母	分 类
K	工具(kogu)	W	钢丝(wire)
U	特殊用途(use)	C	铸件(casting)
P	钢板(plate)	F	锻件(forging)
T	钢管(tube)		

表 3-25 JIS 结构钢钢组代表字母

钢组	代表字母	说明	钢组	代表字母	说明
碳素钢	S × × C, S × × CK	C-碳	铬钼钢	SCM	C-Cr, M-Mo
锰钢	SMn		镍铬钢	SNC	N-Ni
锰铬钢	SMnC	C-Cr	镍铬钼钢	SNCM	
铬钢	SCr		铝铬钼钢	SACM	A-Al

表 3-26 JIS 表示钢材形状,制造方法和热处理的符号

类 别	符 号	含 义	符 号	含 义
表示钢材 形状符号	—CP	冷轧板	—HP	热轧板
	—CS	冷轧带	—HS	热轧带
	—TB	锅炉热交换器用钢管	—TP	管道用钢管
			—WR	线材
表示制造 方法符号	—R	沸腾钢	—T8	切削(8 表示精度等级)
	—K	镇静钢	—A	铝脱氧镇静钢
	—S-C	冷拔无缝钢管	—S-H	热轧无缝钢管
	—B	对接焊管	—E	电阻焊管
	—D9	冷拔(9 级精度)	—A	电弧焊管
	—G7	磨削(7 级精度)		
表示热处 理符号	—A	退火		
	—Q	淬火、回火		
	—SR	去应力处理		
	—N	正火		
	—S	固溶或调质		
举例	钢号	含 义		
	SS400-D2	按 2 级公差要求冷拔的,抗拉强度 $\leq 410\text{MPa}$ 的碳素结构用钢材		
	SUS410-A-D	经退火的冷拉 410 不锈钢		

表 3-27 所列为机械制造用合金结构钢主要合金元素质量分数(%)含量数字代号与元素含量范围。其碳含量数字代号举例示于表 3-28。不锈钢材牌号附加后缀代号列于表 3-29。工程建设和结构用钢材牌号的字母代号列于表 3-30。压力容器用钢材牌号的字母代号列于表 3-31。钢板(带)和镀层钢板(带)牌号字母代号列于表 3-32。钢管牌号的字母代号列于表 3-33。线材和钢丝牌号的字母代号列于表 3-34。锻材牌号的字母代号列于表 3-35。

JIS 标准各类钢钢号表示方法列于表 3-36。

表 3-27 主要合金元素质量分数(%)含量数字代号与元素含量范围对照

主要合金元素 含量数字代号	锰钢	锰铬钢		铬钢	铬钼钢	
	Mn	Mn	Cr	Cr	Cr	Mo
2	> 1.00	> 1.00	> 0.30	> 0.30	> 0.30	> 0.15
	< 1.30	< 1.30	< 0.30	< 0.80	< 0.80	< 0.30

(续)

主要合金元素 含量数字代号	锰钢	锰铬钢		铬钢	铬钼钢	
	Mn	Mn	Cr	Cr	Cr	Mo
4	> 1.30	> 1.30	> 0.30	> 0.80	> 0.80	> 0.15
	< 1.60	< 1.60	< 0.90	< 1.40	< 1.40	< 0.30
6	> 1.60	> 1.60	> 0.30	> 1.40	> 1.40	> 0.15
			< 0.90	< 2.00		< 0.30
8	—	—	—	—	> 0.80 < 1.40	> 0.30 < 0.60

主要合金元素 含量数字代号	镍铬钢		镍铬钼钢		
	Ni	Cr	Ni	Cr	Mo
2	> 1.00	> 0.25	> 0.20	> 0.20	> 0.15
	< 2.00	< 1.25	< 0.70	< 1.00	< 0.40
4	> 2.00	> 0.25	> 0.70	> 0.40	> 0.15
	< 2.50	< 1.25	< 2.00	< 1.50	< 0.40
6	> 2.50	> 2.50	> 2.00	> 1.00	> 0.15
	< 3.00	< 1.25	< 3.50		< 1.00
8	> 3.00	> 0.25 < 1.25	> 3.50	> 0.70 < 1.50	> 0.15 < 0.40

表 3-28 碳含量的数字代号举例

例	新钢号	规定的碳含量 (质量分数)(%)	平均值 × 100	数字代号	附注
例 1	S12C	0.10 ~ 0.15	12.5	12	
例 2	S90CK	0.07 ~ 0.12	9.5	9→09	
例 3	SCM420	0.18 ~ 0.23	20.5	20→20	因 Mn 含量高, 取“+1”
	SCM421	0.17 ~ 0.23	20	20→21	
例 4	SMn433H	0.29 ~ 0.36	32.5	32→33	为了和基本钢种一致 基本钢种
	SMn433	0.30 ~ 0.36	33	33	

表 3-29 不锈钢材牌号附加的后缀代号

代号	钢材名称	代号	钢材名称
SUS-×××-B	不锈钢棒材	SUS-×××-TB	锅炉热交换器用不锈钢钢管
SUS-×××-C	涂装不锈钢薄板(单面)	SUS-×××-TBS	卫生管道用不锈钢钢管
SUS-×××-CA	冷轧成形不锈钢等边角钢	SUS-×××-TF	加热炉用不锈钢钢管
SUS-×××-CB	冷精加工不锈钢棒材	SUS-×××-TK	机械结构用不锈钢钢管
SUS-×××-CD	涂装不锈钢薄板(双面)	SUS-×××-TP	配管用不锈钢钢管
SUS-×××-CP	冷轧不锈钢板	SUS-×××-TPD	一般配管用不锈钢钢管
SUS-×××-CS	冷轧不锈钢带	SUS-×××-TPY	大口径电弧焊不锈钢配管
SUS-×××-CSP	冷轧不锈钢弹簧钢带	SUS-×××-W	不锈钢钢丝
SUS-×××-F	压力容器用不锈钢锻件	SUS-×××-WP	弹簧用不锈钢钢丝
SUS-×××-FB	锻件用不锈钢坯	SUS-×××-WR	不锈钢盘条
SUS-×××-HA	热轧不锈钢等边角钢	SUS-×××-WS	冷锻用不锈钢线材
SUS-×××-HP	热轧不锈钢钢板和薄板	SUS-×××-Y	焊接用不锈钢线材

表 3-30 工程建设和结构用钢材牌号的字母代号

代号	钢材名称	代号	钢材名称
SB	锅炉和压力容器用碳钢和钼合金钢材	SMA	焊接结构用耐候性热轧钢材
SB-M	同上	SPA-C	高耐候性冷轧钢材
SBC	链条用圆钢	SPA-H	高耐候性热轧钢材
SBPD	预应力混凝土用圆钢棒	SPTFS	无锡镀铬钢材
SBPR	预应力混凝土用异形钢棒	SR	钢筋混凝土用圆钢棒
SD	钢筋混凝土用钢棒(异形)	SRB	再生碳素钢钢材
SGD	磨光钢材用一般碳钢钢材	SRR	再生钢筋棒材
SGD-D	磨光钢材	SS	一般结构用轧制钢材
SHK	H 形钢桩	SSC	一般结构用冷轧轻型型钢
SKK	钢管桩	SV	铆钉用圆钢
SKY	钢管板桩	SWH	结构用焊接轻型 H 形钢
SM	焊接结构用轧材		

表 3-31 压力容器用钢材牌号的字母代号

代号	钢材名称	代号	钢材名称
SB	锅炉及压力容器用碳素钢	SGV	中、高温压力容器用碳素钢板
SB × × M	锅炉及压力容器用含钼钢板	SLA	低温压力容器用碳素钢板
SBV	锅炉及压力容器用合金钢板	SL × N	低温压力容器用含镍钢板
SCMV	锅炉及压力容器用铬钼合金钢板	SPV	常温压力容器用钢板
SEV	中、常温压力容器用高强度钢钢板	SQV × A(B) ^①	压力容器用调质型合金钢板,分 A, B 两种
SG	高压气体容器用钢板和钢带		

① 经热处理后在钢号最后附加字母:Q—钢板调质处理;P—钢板消除应力处理;TQ—试样经调质处理;SR—试样经消除应力处理。

表 3-32 钢板(带)和镀层钢板(带)牌号的字母代号

代号	钢材名称	代号	钢材名称
SA × C	热浸镀铝薄钢板 ^①	SEHE	深冲压电镀锌热轧薄钢板及带
SA × D	热浸镀铝薄钢板 ^①	SPB	镀锡钢皮原板
SA × E	热浸镀铝薄钢板 ^①	SPCC	一般用冷轧碳钢薄板及带
SAPH	机动车用热轧结构钢板和带	SPCCT	一般用冷轧碳钢薄板及带(抗拉试验)
SDP	瓦垄钢板	SPCD	冲压用冷轧碳素钢薄板及带
SECC	电镀锌钢板(带) ^① , 冷轧板	SPCE	深冲用冷轧碳钢薄板及带
SECD		SPCEN	非时效性深冲冷轧碳钢薄板及带
SECE		SPFC	机动车用成形性好的冷轧高强度钢板及带
SECCT	电镀锌薄钢板及带(抗拉试验)	SPFH	机动车用成形性好的热轧高强度钢板及带
SECD	电镀锌冷轧冲压薄钢板及带	SPGA	建筑用镀锌薄钢板
SECEN	非时效冲压冷轧电镀锌薄板及带	SPGC	一般用镀锌薄钢板
SEHC	通用电镀锌热轧薄钢板及带	SPGD	冲压用镀锌薄钢板
SEHD	冲压电镀锌热轧薄钢板及带	SPGDD	深冲用镀锌薄钢板

(续)

代号	钢材名称	代号	钢材名称
SPGH	一般波纹板用镀锌薄钢板	SPHT	钢管用热轧碳素钢带
SPGR	屋面用镀锌薄钢板	SPP	搪瓷脱碳薄钢板及钢带
SPGS	结构用镀锌薄钢板	SPTTE } SPTH }	电镀锡钢皮及原板
SPGW	建筑波纹板用镀锌薄钢板		
SPHC } SPHD } SPHE }	冲压用热轧软钢板及钢带 ^①	SY	热轧钢板

① 牌号末尾字母:C—一般用途;D—冲压用;E—深冲用。

表 3-33 钢管牌号的字母代号

代号	钢材名称	代号	钢材名称
SCM-TK	结构用合金钢管	STFA	加热炉用合金钢钢管
SCP-A } SCP-E } SCP-P } SCP-R } SCP-RS }	波纹钢管	STH	高压气体容器用无缝钢管
SCP	碳素钢配管	STK	一般结构用碳素钢钢管
SGPW	镀锌水管	STKM	机械结构用碳素钢钢管
STAM × × G	机动车用电阻焊碳素钢钢管	STKR	一般结构用方形钢管
STAM × × H	机动车用电阻焊碳素钢钢管(高屈服强度)	STKS	结构用合金钢钢管
STB	锅炉热交换器用碳素钢钢管	STM-C	钻探用无缝钢管(套管)
STBA	锅炉热交换器用合金钢钢管	STM-R	钻探用无缝钢管(钻杆)
STBL	低温热交换器用钢管	STO	油井用无缝钢管
STC	汽筒用碳素钢钢管	STPA	配管用合金钢钢管
STF	加热炉用碳素钢管	STPG	压力配管用碳素钢管
		STPL	低温配管用钢管
		STPT	高温配管用碳素钢管
		STPY	配管用电弧焊碳素钢管
		STS	高压配管用碳素钢管

表 3-34 线材和钢丝牌号的字母代号

代 号	钢 材 名 称
SW ^①	冷拉高碳钢钢丝
SWCD ^①	预应力钢筋混凝土用冷拉高碳钢圆线材
SWCH ^①	冷锻用碳素钢线材
SWCR ^①	预应力钢筋混凝土用冷拉高碳钢异形线材
SWM ^④	低碳钢钢丝
SWMC	着色涂装钢丝
SWMG	铠装电缆用低碳镀锌钢线材
SWMV	聚氯乙烯涂覆彩色钢丝
SWO ^⑤	阀弹簧用碳钢油浴回火钢丝
SWOCV-V	阀弹簧用铬钒合金钢油浴回火钢丝

(续)

代 号	钢 材 名 称
SWOSC-V	阀弹簧用硅铬合金钢油浴回火钢丝
SWOSM	油回火硅锰合金钢弹簧钢丝
SWO-M	阀弹簧用碳钢油回火钢丝
SWP ^②	琴钢丝
SWPD	预应力钢筋混凝土用钢丝和钢绞线(异形线)
SWPR	预应力钢筋混凝土用钢丝和钢绞线(圆线)
SWRCH ^③	冷锻用碳钢线材
SWRH ^④	高碳钢盘条
SWRM	低碳钢盘条
SWRS ^⑤	琴钢丝用盘条
SWRY	涂药电焊条芯用盘条
SWY	涂药电焊条芯线

① 按力学性能又分为 A, B, C 三种。

② 按用途又分为 A, B, V 三种。

③ 钢号末尾附加“R”为沸腾钢,“K”为镇静钢,“A”为铝镇静钢。

④ 钢号末尾附加“-B”为普通铁丝,“-A”为退火或正火的,“-G”为镀锌铁丝,“-N”为制钉用铁丝。

⑤ 按抗拉强度分为 A, B 两种。

⑥ 按锰含量不同分为 A, B 两种。

表 3-35 锻材牌号的字母代号

代 号	钢 材 名 称	代 号	钢 材 名 称
SF	碳素钢锻件	SFNCM	一般用镍铬钼钢锻件
SFB	碳素钢锻件用坯	SFVA	高温压力容器用合金钢锻件
SFCM	一般用铬钼钢锻件	SFVC	压力容器用碳素钢锻件
SFHV ^①	高温压力容器用合金钢锻件	SFVQ	压力容器用调质合金钢锻件
SFL	低温压力容器用锻件	SFVV	经真空处理的压力容器用钢锻件

① 根据回火温度的不同分为 A, B 两种。

表 3-36 JIS 标准各类钢钢号表示方法

钢类别	钢号表示法举例	采用标准	说 明
普通结构钢	SS400	JIS G3101—1995	第 1 个 S—钢(steel), 第 2 个 S—结构钢(structural) 数字 × × × —抗拉强度(MPa)
	SM490	JIS G3106—1999	M—中碳, 数字 × × × —抗拉强度(MPa), A—质量等级
	SM490A		
	SM490YA		Y—在抗拉强度相同时, 要求有更高的屈服强度
机械制造用 结构钢	S15C	JIS G4051—1979	碳素结构钢: S—钢, × × —平均碳含量 $w_c\% \times 100$
			C—优质碳素钢
	S15CK		CK—渗碳钢
	S○○○×××○	JISG4102—4106 G4052	合金结构钢: S—钢, ○○○—主要合金元素符号, ×—主要合金元素含量数字代号, × × —平均含碳量 $w_c\% \times 100$, ○—后缀符号

(续)

钢类别	钢号表示法举例	采用标准	说 明
易切削钢	SUM × × SUM × × L		M—切削(machinability),第1位数表示钢类型: 1—硫易切削钢;2—提高硫磷含量的易切削钢;3—提高碳含量的磷易切削钢;4—碳锰易切削钢,第2位数为序号,L—加铅易切削钢
弹簧钢	SUP × (×)		P—弹簧(spring), × (×)——一位或二位数字表示序号
轴承钢	SUJ ×		J—轴承(轴受)钢,现行轴承钢 SUJ1—5
碳素工具钢	SK ×		K—工具(kogu), × —序号
合金工具钢	SKS		最后 S—special,主要用于切削工具耐冲工具
	SKD		部分冷作模具:
	SKT		D—dies,主要用于部分冷作模具,部分热作模具
高速工具钢	SKH × (×)		T—锻造(日文 tanzo),主要用于部分热作模具
			H—high speed, × (×)—序号,用以区分钨系或钼系高速钢,2~10为钨系高速钢,50~59为钼系高速钢
不锈钢	SUS × × ×		第3个字母 S 表示 stainless, × × × 是三位数编号,基本参照美国 AISI 标准,超低碳不锈钢在数字后加 L,添加 Ti、Se、N 钢种在数字后分别加 Ti、Se、N
耐热钢	SUH	JIS G4311 G4312—1991	H—heat resisting,现行标准中部分用原先 1~2 位数字号,另部分参照 AISI 的三位数字号
耐热合金	NCF × × × ○		NCF—Ni—Cr—Fe 合金, × × × 为数字编号,后缀 ○ 表示品种规格:P—板材,B—棒材,TP—管、线或无缝管,TB—热交换器用无缝管,TF—加热炉用无缝管
电工硅钢	35A250 27P120	JIS C2552—1986 (无取向) JIS C2553—1986 (取向)	35 是公称厚度(0.35mm) × 100, A—无取向,250—铁损值 × 100(P15/50 = 2.50W/kg) 27 是公称厚度(0.27m) × 100, P—高磁感取向, G—普通取向,120—铁损值 × 100(P17/50 = 1.20W/kg)

3.9 俄罗斯 ГОСТ 标准钢号表示方法

俄罗斯 ГОСТ 继承了前苏联国家标准(Государственный Стандарт)。前苏联还有一个 OCT 全苏标准(Общесоюзный Стандарт)。两个标准中的钢铁牌号表示方法基本相同。现在只剩下一个 ГОСТ 国家标准了。表 3-37 所列为钢中合金元素的代号。拉丁字母与俄文标准钢号字母的对照列于表 3-38。ГОСТ 标准钢号中采用的各种代号列于表 3-39。

表 3-37 ГОСТ 标准中钢的合金元素代号

元素	化学符号	代号	元素	化学符号	代号
铝	Al	Ю	铌	Nb	Б
硼	B	Р	镍	Ni	Н
碳	C	У	钒	V	Ф
钴	Co	К	钛	Ti	Т
铬	Cr	Х	钨	W	В
铜	Cu	Д	锆	Zr	Ц
锰	Mn	Г	硅	Si	С
钼	Mo	М			

表 3-38 拉丁字母与俄文标准钢号字母对照

拉丁字母	俄文字母	拉丁字母	俄文字母	拉丁字母	俄文字母	拉丁字母	俄文字母
A	А	I	И	P	П	U	У
B	В	Ju(YU)	Ю	R	Р	V(W)	В
Ch(KH)	Х	K	К	S	С	W(V)	В
CH	Ч	KH(Ch)	Х	SH	Ш	Ya	Я
D	Д	L	Л	SHCH	Щ	Yu(Ju)	Ю
E	З	M	М	T	Т	Z	З
F	Ф	N	Н	TS	Ц	ZH	Ж
G	Г	O	О				

例: GOST = ГОСТ, BDS = ВДС, 60G = 60Г

40Ch(40KH) = 40X

表 3-39 ГОСТ 标准钢号表示方法

钢类型	符 号	说 明
普通碳素钢	CT.0	硫磷含量出格的钢
	CT.1	保证 σ_b 、 σ_s 、 δ 和冷弯性能的钢
	CT.2	除保证性能,也保证化学成分的钢
	CT.3 ~ 6	除保证性能和成分外,还要保证冲击韧度。其中 CT.3 在 +20℃、CT.4 在 -20℃、CT.5 经时效钢板 -20℃、CT.6 只对钢板 -40℃
	KП	沸腾钢
	ПС	半镇静钢
	СП	镇静钢
优质碳素结构钢	新钢号 C235	表示 $\sigma_s \geq 235\text{MPa}$,有向 ISO 标准接轨趋向
	10KП	平均含碳 $w_c 0.10\%$ 的优质碳素沸腾钢,沸腾钢和镇静钢分别标以 KП 和 ПС
	10	镇静钢,平均含 $w_c 0.10\%$
	30Г	平均含 $w_c 0.30\%$ 、含锰稍多的优质碳素钢
低合金高强度钢	45A	平均含 $w_c 0.45\%$ 的高级优质钢
	C265、295、325、345、355、375、390、440	数字为屈服强度下限(MPa)
	18Г2ЮФД	以化学成分表示的旧钢号是一种过渡措施。该例系指含碳 $w_c 0.14\% \sim 0.22\%$,含锰 $w_{Mn} 1.30\% \sim 1.70\%$,尚含 Al、V、Cu 的钢
专用钢材	混凝土钢筋	有 11 个钢号、均为低合金钢、表示方法与以化学成分表示的一般低合金高强度钢相同
	A、B、D、E 造船用钢	屈服强度均为 235MPa 的钢
	A××、D××、E×× 造船用钢	高强钢、×× 表示强度等级,例如 A32 表示强度为 315MPa、D40 表示强度为 395MPa 的钢
	桥梁用钢	有 4 个钢号、均为低合金钢,表示方法与以化学成分表示的低合金高强度钢相同
	铁道用钢 M××(п)	×× 表示平均含碳量 [$w_c \% \times 100$],(п) 表示微量合金元素,如 M73T,T 表示含 Ti

(续)

钢类型	符 号	说 明
合金结构钢	30XΓCA	前面2位数表示平均碳含量 $w_C 0.30\%$, XΓC 表示 Cr、Mn、Si, A 为高级优质钢
弹簧钢	60C2ΓA	平均含碳 $w_C 0.60\%$, 平均含锰 $w_{Mn} 2\%$, 尚含 Si 的高级优质钢
易切削钢	A40Γ AC20XΓHM	平均含碳 $w_C 0.40\%$ 含锰稍高的易切钢 平均含碳 $w_C 0.20\%$, 含 Cr、Mn、Ni、Mo 的含铅(AC)易切削钢
高碳铬轴承钢	ШX15 ШX15CΓ	Ш 代表滚珠轴承钢, X 代表铬钢, 数字代表平均含碳 $w_C 1.5\% \times 10$, CΓ 为 Si、Mn
碳素工具钢	Y7 Y8ΓA	Y 代表工具钢, 数字为平均含碳量 $w_C 0.7\% \times 10$ Γ 是 Mn, A 代表优质碳素工具钢
合金工具钢	XBΓ X12MΦ 3X2B8Φ	对 $w_C \geq 1.0\%$ 的钢前面不标碳含量, 对 $w_C < 1.0\%$ 的钢以 $w_C \% \times 10$ 表示, 合金元素铬钼(X、M)以平均 w_{Cr} 、 $w_{Mo} \%$ 数字表示。合金工具钢不分优质和高级优质钢, 所有钢号后缀不加“A”
高速工具	P18 P18K5Φ2 P18K5(PK5) P18K10(PK10)	P 表示高速工具钢, 数字表示钨平均含量 $w_W 18\%$, 钼、钴、钒以 M、K、Φ 表示, 其平均含量以 $w_{Mo} \%$ 、 $w_{Co} \%$ 、 $w_V \%$ 表示
不锈钢耐热钢	30X13(3X13) 40X9C2(4X9C2) 03X16H15M3 (00X16H15M3)	与合金结构钢表示方法一致, 碳含量以平均 $w_C \times 100$ 表示, 旧钢号以 $w_C \% \times 10$ 表示, 合金元素平均含量以分数表示。过去也曾用字母 ЭЖ 或 Ж 表示 铬不锈钢, 用字母 ЭЯ 或 Я 表示镍铬不锈钢, 不标出含碳量, 合金元素以平均百分数表示
耐蚀合金或耐热合金	XH40B XH77BTIO XH85MIO	
电工钢	1211 (Э11), 1212 (Э22), 1413 (Э33), 1514 (Э43A), 2011 (Э0100), 2111 (Э1000), 2311 (Э2200), 2411 (Э3100), 3311 (Э411), 3424 (Э360A)	第1位数字: 1—热轧无取向硅钢; 2—冷轧无取向; 3—冷轧取向。第2位数字表示硅含量 $w_{Si} \% : 0 < 0.40; 1—0.40 \sim 0.80; 2—> 0.80 \sim 1.80; 3—> 1.80 \sim 2.80; 4—> 2.80 \sim 3.80; 5—> 3.80 \sim 4.80$ 第3位数字表示磁能组别: 0—P1.7/50 铁损值组别; 1—P1.5/50 组别; 2—P1.0/400 或 P1.5/400; 6—弱磁场磁感应强度组别, 即 $B_{0.4}$; 7—中等磁场磁感应强度组别, 即 B_{10} 或 B_5 。第4位数字是序号。旧钢号前冠以字母 Э, 后以 2~4 位数字组成; 1 位数字—是 1~4, 表示硅含量等级; 2 位数字—1~4 表示保证电磁性能; 3、4 位数(0,00)表示冷轧硅钢的晶粒取向程度

3.10 国际标准化组织(ISO)钢号表示方法

ISO 标准钢号表示方法分主要以力学强度表示的钢号(表 3-40)和主要以化学成分表示的钢号(表 3-41)以及主要以用途表示的钢号等三类。表 3-42 所列为钢号热处理状态后缀字母及其含义。表 3-43 所列为合金元素表示方法。

表 3-40 ISO 标准主要以力学强度表示的钢号

钢类别	钢号	标准	说 明
结构用非合金钢 和工程用非合金钢	S235 (Fe360) E235 (Fe360)		<p>结构用钢以 S 表示, 后面数字是屈服强度 (MPa), S235 相应的旧钢号是 Fe360, 是指抗拉强度 $\geq 360\text{MPa}$</p> <p>工程用钢以 E 表示, 数字是屈服强度 (MPa)。E235 相应的旧钢号也是 E360。此二类钢常用 A, B, C, D, E 的后缀表示不同强度下的冲击吸收功 (A_{KV}) 保证值</p>
低合金高强度钢	E355 ~ E690 E355CC E355DD	ISO4950 ISO4951	数字为屈服强度下限 (MPa), 后缀字母 CC、DD 表示不同温度下的冲击吸收功 (A_{KV}) 保证值
耐候钢	Fe235W Fe355W	ISO4952—1981E	也称耐大气腐蚀钢, 后缀字母 A、B、C、D 区别质量等级, C、D 还规定必须有 Al、Nb、Ti 细化晶粒元素的一种
其他钢材	钢板、钢管、 钢筋等		<p>旧钢号用前缀字母 + 序号、新钢号前缀字母 + 力学性能值, 必要时再加后缀字母。前缀字母: P—钢板, PL—低温用钢板, PH—高温用钢板, HR—热轧钢板, CR—冷轧钢板, T—钢管, TS—无缝钢管, TW—焊管, B—钢筋, RB—钢筋混凝土用钢筋, PB—光圆钢筋</p> <p>后缀字母: N—正火 (或控轧), 正火 + 回火, Q—淬火 + 回火 (或沉淀硬化)</p>

表 3-41 ISO 标准主要以化学成分表示的钢号

钢类别	钢号	标准号	说 明
适用于热处理的 非合金钢	C25 C25E4 C25M2		<p>相当于优质碳素钢, 数字表示平均碳含量 $w_C\% \times 100$, 后缀和数字表示按硫磷含量区分的优质、高级优质钢, 如不加后缀 (C25) 钢, $w_P \leq 0.045\%$, $w_S \leq 0.045\%$; C25E2: $w_P \leq 0.035\%$, $w_S \leq 0.035\%$; C25M2: $w_P \leq 0.035\%$, $w_S \leq 0.02\% \sim 0.040\%$</p>
	C25, C25e C25ea, C25eb	ISO683.18— 1976	<p>老标准仍在用, 对不同含 S、P 的优质钢和高级优质钢采用原来的后缀字母, 如 C25: $w_P \leq 0.050\%$, $w_S \leq 0.050\%$; C25e: $w_P \leq 0.035\%$, $w_S \leq 0.035\%$; C25ea: $w_P \leq 0.035\%$, $w_S \leq 0.020\% \sim 0.035\%$; C25eb: $w_P \leq 0.035\%$, $w_S \leq 0.030\% \sim 0.050\%$</p> <p>在 ISO 标准改革过渡期, 上列两种表示方法共存</p>
合金结构钢和 弹簧钢	36CrNiMo4	调 质 钢 ISO683-1—1987; 表面硬化钢 ISO683-10— 1987; 683-11— 1987 弹 簧 钢 ISO683-14—1992 ISO683-9—	<p>前列数字表示平均含碳量 $w_C\% \times 100$, 中间为元素符号, 最后的数字是第 1 种元素 (Cr) 的平均含量和该元素乘数 (见表 3-43) 的乘积</p>
易切削钢	10S20 44SMn28 12SMnPb35	1988	<p>按热处理工艺分非热处理, 表面硬化和直接淬火易切削三类。钢号表示方式主要按化学成分分为硫易切钢 (10S20)、硫锰易切钢 (44SMn28) 和加铅易切钢 (12SMnPb35) 三种, 其表示方法和合金结构钢相同</p>

(续)

钢类别	钢号	标准号	说 明
冷镦钢和冷挤压钢	CC4X-CC15X CC4A-CC21A CE20E4 18CrMo4E	ISO4954—1993	分热处理和非热处理两类, 非热处理的两类钢都是非合金钢, 前缀字母 CC 和数字是平均含碳量 $w_C\% \times 100$, 常见后缀字母: X—非沸腾钢, K—镇静钢, A—铝镇静钢。经热处理的两类钢包括非合金钢和合金钢, CE—非合金钢前缀, E—合金钢前缀
轴承钢	B1-B8, B2X- B3X B4X, B5X, B6X	ISO683-17—1999	分 5 个系列: 1—全淬透钢 (编号 1~5); 2—表面硬化钢 (编号 10~16); 3—高频淬火钢, 4—不锈钢轴承钢 (编号 20~21); 5—高温轴承钢 (编号 30~32)。轴承钢以化学成分表示: 1~3 系列与合金结构钢表示方法相同; 4~5 系列与不锈钢、耐热钢同
不锈钢	新钢号, 如奥氏体钢 X2CrNi18-7 铁素体钢 X6Cr13 马氏体钢 X30Cr13 沉淀硬化钢 X7-CrNiAl17-7	ISO/TR15510: 1997	采用和欧洲标准 EN 的高合金钢表示方法, X 后的数字表示含碳量: 1— $w(C) \leq 0.020\%$, 2— $w(C) \leq 0.030\%$, 3— $w(C) \leq 0.04\%$, 5— $w(C) \leq 0.07\%$, 6— $w(C) \leq 0.08\%$, 7— $w(C) 0.04\% \sim 0.08\%$ 。后面是按含量高低排列的合金元素符号。最后用几组数字标出主要合金元素的平均百分数 (化整) 旧钢号: 铁素体型 Type 1, 2, 8, 9c; 马氏体型 Type 3、4、5、7、9a, 9b; 奥氏体型 Type10~24 及 A2~A4
耐热钢和耐热合金	铁素体型 H1~H7 奥氏体型 H10~H18 耐热合金 H20~H22 (以上是旧钢号) 新合金号, 如 NiCr20Ti 如马氏体型 X50CrSi8 2 奥氏体型 X55CrMnNiN20 8 镍基合金 NiCr15Fe7TiAl		1999 年修订标准中保留旧钢号 (老钢种), 采用新钢号 (新增钢种), 二者都沿用 镍基合金以 Ni 代 X, 数字为前邻元素平均百分数
阀门钢			1992 年标准的阀门钢表示方法和不锈钢相同, 有 3 个镍基耐热合金
非合金工具钢	如 C90U 旧钢号 TC90	ISO4957: 1999	1999 年修订标准采用和欧洲标准 EN 一样的钢号表示方法, 中间数字表示平均含碳量 $w(C) 0.90\% \times 100$
合金工具钢	如 X153CrMoV12		表示方法与合金结构钢相同。对平均含碳量超过 1.00% 的钢, 用 3 位数字表示。对钢中合金元素有一种超过 5%, 按高合金钢钢号表示
高速工具钢	HS2-9-1-8		HS 表示高速钢, 后面的数字按 $w(W)\% - w(Mo)\% - w(V)\% - w(Co)\%$ 顺序表示其百分含量。不含 Mo 的钢用数字“0”表示, 不含 Co 的钢不必加“0”

表 3-42 钢号热处理状态后缀字母及其含义

代表字母	含义	代表字母	含义
TU	未处理	TQF	经形变淬火
TA	经退火 (软化退火)	TQB	经等温淬火
TAC	经球化退火	TP	经沉淀硬化处理
TM	经形变处理	TT	经回火
TN	经正火 (或控轧)	TSR	经消除应力处理
TS	经固溶处理	TS	为改善冷剪切性能的热处理
TQ	经淬火	H	保证淬透性
TQW	经水淬	E	用于冷锻的
TQO	经油淬	TC	经冷处理的
TQA	经空冷淬火	THC	经热/冷处理的
TQS	经盐浴淬火		

表 3-43 ISO 标准低合金钢和合金钢合金元素含量表示方法^①

合金元素	乘数 (平均含量的 % 乘以)
Cr、Co、Mn、Ni、Si、W	4
Al、Be、Cu、Mo、Nb、Pb、Ta、Ti、V、Zr	10
Ce、N、P、S	100
B	1000

① 与德国 DIN 标准相同。

3.11 英国 BS 标准钢号表示方法

BS970 标准钢号基本结构列于表 3-44。钢号基本结构各位数字符号分类说明见表 3-45。合金结构钢钢号中第 1、2 位数字表示的钢组系列列于表 3-46。表 3-47 所列为 BS 标准各类钢钢号表示方法的分类说明。

表 3-44 BS970 标准钢号基本结构

钢号表示方式	说 明
X XX○ XX	第 1 位数字是类别号。第 2、3 位数字表示特性、化学成分或钢组序号。第 4 位是字母, 表示供应条件或材料类型。第 5、6 位也是数字, 表示碳含量或基本成分相同的钢组中各钢号的区分号

表 3-45 BS 标准钢号各位数字符号分类及说明

第 1 位数字	0	1	2
钢类	碳素钢		
	普通含锰钢	较高含锰钢	易切削钢
第 1 位数字	3	4	5~9
钢类	不锈钢		
	奥氏体钢	马氏体和铁素体钢	分类详见 DIN17006 系统钢号字母数字代号
第 2、3 位数字	含义在表 3-46 的按钢类说明中解释		
第 4 位字母	字母	说明	
	A (analyse)	表示按化学成分供应	
	M (Mechanical)	表示保证力学性能	
	H (hardenability)	表示保证淬透性	
	S (stainless)	表示不锈钢和耐热钢	

表 3-46 合金钢钢号中第一、二位数字表示的钢组系列

第一、二位 数字	钢组系列	第一、二位 数字	钢组系列
50	Ni 钢	78	MnNiMo 钢
51	(保留备用)	79	(保留备用)
52	Cr 钢 [平均 $w_{(Cr)} < 1\%$]	80	NiCrMo 钢 [平均 $w_{(Ni)} < 1\%$]
53	Cr 钢 [平均 $w_{(Cr)} \geq 1\%$]	81	NiCrMo 钢 [平均 $w_{(Ni)} 1\% \sim 1.5\%$]
54 ~ 59	(保留备用)	82	NiCrMo 钢 [平均 $w_{(Ni)} 1.5\% \sim 3\%$]
60	MnMo 钢	83	NiCrMo 钢 [平均 $w_{(Ni)} 3\% \sim 4.5\%$]
61 ~ 62	(保留备用)	84 ~ 86	(保留备用)
63	NiCr 钢 [平均 $w_{(Ni)} < 1.1\%$]	87	CrNiMo 钢 [$w_{(Cr)}$ 为主要元素, $> 1\%$]
64	NiCr 钢 [平均 $w_{(Ni)} 1.1\% \sim 2.5\%$]	88	(保留备用)
65	NiCr 钢 [平均 $w_{(Ni)} 2.5\% \sim 4.5\%$]	89	CrMoV 钢
66	NiMo 钢	90	CrMoAl 钢
67 ~ 69	(保留备用)	91	(保留备用)
70	CrMo 钢 [平均 $w_{(Cr)} < 1.1\%$]	92	SiMnMo 钢
71	(保留备用)	93	(保留备用)
72	CrMo 钢 [平均 $w_{(Cr)} \geq 3\%$]	94	MnNiCrMo 钢
73	CrV 钢	95 ~ 99	(保留备用)
74 ~ 77	(保留备用)		

表 3-47 BS 标准各类钢钢号表示方法分类说明

钢类型	钢号举例	说 明
碳素钢		
普通含锰量 碳素钢		第 1 位数为 0, 第 2、3 位数字是平均锰含量 $w_{Mn} \times 100$, 第 5 和 6 位数字是平均碳含量 $w_C \% \times 100$
	040A10	平均含碳 $w_C 0.10\%$, $w_{Mn} 0.40\%$, 按保证成分供应
	070M26	平均含碳 $w_C 0.26\%$, 含锰 $w_{Mn} 0.70\%$, 按保证力学性能供应
	080H41	平均含碳 $w_C 0.41\%$, 含锰 $w_{Mn} 0.80\%$, 按保证淬透性供应
较高含锰量 碳素钢		第 1 位数字是 1, 第 2、3 位数字组合表示平均锰含量 $w_{Mn} \% \times 100$, 第 5、6 位数字表示平均碳含量 $w_C \% \times 100$
	125A15	平均含碳 $w_C 0.15\%$, 含锰 $w_{Mn} 1.25\%$, 保证成分供应
	150M19	平均含碳 $w_C 0.19\%$, 含锰 $w_{Mn} 1.5\%$, 保证力学性能供应
含硼碳素钢		该类钢含锰也高, 故钢号第 1 位数字为 1, 第 2 位用 7 或 8, 表示为含硼钢组。第 4 位字母是 H (保证淬透性), 第 5、6 位数字是平均碳含量 $w_C \% \times 100$
	170H20	平均含碳 $w_C 0.20\%$, 含锰 $w_{Mn} 0.95\%$, 含硼 $w_B 0.0005\% \sim 0.005\%$, 要求保证淬透性 (H)
	185H40	平均含碳 $w_C 0.40\%$, 含锰 $w_{Mn} 1.5\%$, 含硼同上
易切削碳素钢		第 1 位数字为 2, 第 2、3 位数字为平均或最低硫含量 $w_S \% \times 100$, 第 5、6 位数字表示平均碳含量 $w_C \% \times 100$
	216M28	平均含碳 $w_C 0.28\%$, 含硫 $w_S 0.16\%$ 的硫系易切削钢, M 表示按保证力学性能供应

(续)

钢类型	钢号举例	说 明
合金钢		包括合金结构钢, 弹簧钢和轴承钢。钢号前 3 位数字为钢类或钢组, 其中第 1、2 位数字以 50~99 表示, 第 5、6 位数字表示平均碳含量 $w_C\% \times 100$
	708A30	表示含碳 $w_C 0.28\% \sim 0.33\%$, 含铬 $w_{Cr} 0.90\% \sim 1.20\%$, 含钼 $w_{Mo} 0.15\% \sim 0.25\%$ 的铬钼钢
	735A50	表示含碳 $w_C 0.46\% \sim 0.54\%$, 含铬 $w_{Cr} 0.80\% \sim 1.10\%$, 含钒 $w_V \geq 0.15\%$ 的铬钒钢, 常作为弹簧钢
	535A99	含碳 $w_C 0.95\% \sim 1.10\%$, 含铬 $w_{Cr} 1.20\% \sim 1.60\%$ 的高碳铬钢, 主要用作轴承钢
不锈钢和耐热钢	2××S××	表示铬锰镍奥氏体不锈钢
	3××S××	表示 Cr-Ni, Cr-Ni-Mo 等组类的奥氏体不锈钢。如 304S15 相当于美国 AISI304 不锈钢, 304S12 相当于 AISI304L 钢
	4××S××	马氏体和铁素体不锈钢, 如 403S17 相当于 AISI403
		441S29 为高 S、含 Se 易切削不锈钢
工具钢	BW×—水淬碳工钢	工模具钢钢号列于 BS4659 (1989)。钢号由两个字母和 1、2 位数字序号组成, 有的还附加 A、B、C 后缀。钢号第 1 个字母“B”(British)表示英国牌号, 第 2 个字母及后面序号和 AISI 工具钢体系相似, 后缀字母区分基本成分不同的不同钢种
	BS×—耐冲工具钢	
	BO×—油淬合金工钢	
	BA×—空淬合金工钢	
	BD×—冷作模具钢	
	BH××—热作模具钢	
	BP××—塑料模具钢	
	BF×—碳钨工具钢	
	BL×—特种用途低合金工钢	
	BT×(×)—钨系高速钢	
	BM×(×)—钼系高速钢	

3.12 韩国 KS 标准钢号表示方法

KS (Korean Standard) 钢铁材料标准主要引用了日本 JIS 标准, 其钢号表示方法基本上与 JIS 相同, 只是钢号字母或排列顺序略有差异, 有些钢铁牌号几乎完全相同。

韩国 KS 标准钢铁牌号大多采用英文字母和数字, 其主体结构由三部分组成。第一部分是前缀字母: S 表示钢, 适用于大多数钢种和钢材, 不适于丝材, 耐热铸钢等; C 表示铸钢和铸铁, 经常是第 2 个字母; Y 表示各类钢焊丝。第二部分的英文字母表示用途、成分及铸锻件制品, 并常和第一部分组合使用 (见表 3-48)。第三部分是数字, 对结构钢数字表示钢的强度数值, 或表示成分或顺序号; 对工具钢, 数字是表示区别不同钢种的顺序, 对不锈钢, 数字表示钢的系列号。钢号主体结构之后, 根据需要还可附加一些后缀符号。

表 3-48 KS 标准钢号字母代表的钢类

钢号字母	钢的类别	钢号字母	钢的类别
SX×C	碳素结构钢	STF	合金工具钢
SMn	含锰结构钢	STS	不锈钢
SCr	铬结构钢	STR	耐热钢
SCM	铬钼结构钢	NCF	耐热合金 (Ni-Cr-Fe)
SNC	镍铬结构钢	SC	碳素铸钢
SACM	铬钼铝结构钢	SCMnH	高锰铸钢
SUM	易切削结构钢	SCS	不锈钢
SSB	锅炉与压力容器用	SCH	耐热铸钢
	碳钢板	SCPH	高温高压用铸钢
SM	机械结构用碳素钢	SCPL	低温高压用铸钢
SPS	弹簧钢	SWR	线材
STB	轴承钢	SKH	高速工具钢
STC	碳素工具钢	MSWR	中碳钢线材
STD	合金工具钢	HSWR	高碳钢线材

3.13 世界主要国家铸铁牌号表示方法

1. 法国铸铁牌号表示方法

法国的铸铁由于一部分已采用欧洲标准 (EN)，而一部分仍用 NF 标准，所以铸铁的牌号表示方法，亦属于新旧牌号交替过程。新旧两种牌号基本上均采用前缀字母加数字组成 (有的牌号加元素符号)，一部分牌号用数字表示材料强度，一部分牌号用数字表示元素含量，这是两者相似之处。但新旧牌号所采用的前缀字母有所不同，对照如下：

EN-GJL (旧牌号：FGL) ——灰铸铁。

EN-GJS (旧牌号：FGS) ——球墨铸铁。

EN-GJMW (旧牌号：MB) ——白心可锻铸铁。

EN-GJMB (旧牌号：MN) ——黑心可锻铸铁。

FB——抗磨铸铁，L——片状石墨奥氏体铸铁，S——球状石墨奥氏体铸铁，这三类尚无新牌号。

例 1 灰铸铁牌号 EN-GJL-150，表示 $\sigma_b \geq 150\text{MPa}$ 。

例 2 球墨铸铁牌号 EN-GJS-350-22-RT，表示 $\sigma_b \geq 350\text{MPa}$ ， $\delta \geq 22\%$ ，后缀字母“RT”——用于室温，“LT”——用于低温。

例 3 白心可锻铸铁牌号 EN-GJMW-400-5，表示 $\sigma_b \geq 400\text{MPa}$ ， $\delta \geq 5\%$ (采用公称直径 12mm 的试样测定)。

例 4 抗磨白口铸铁牌号 FBCr9Ni5，表示平均含量含 $w_{Cr} 9\%$ ，含 $w_{Ni} 5\%$ 。

例 5 片状石墨奥氏体铸铁牌号 L-NUC15-6-2，表示平均含量含 $w_{Ni} 15\%$ ，含 $w_{Cu} 6\%$ ，含 $w_{Cr} 2\%$ 。

其余未举例的铸铁牌号，可以类推。

2. 德国铸铁牌号表示方法

(1) 铸铁牌号主要有两类表示方法 一类由前缀字母 + 数字组成, 数字表示力学性能; 另一类由前缀字母 + 合金元素符号 + 数字组成, 数字表示主要元素的质量分数含量。

(2) 第一类铸铁牌号又有两种情况 字母后只有一组数字的, 表示抗拉强度 (MPa) 最低值; 字母后有二组数字的, 表示抗拉强度 (MPa) 和伸长率 (%) 的最低值。举例如下:

GG-20——灰铸铁, 抗拉强度 $\geq 20\text{MPa}$ 。

GGG-40——球墨铸铁, 抗拉强度 $\geq 40\text{MPa}$ 。

GGV-30——蠕墨铸铁, 抗拉强度 $\geq 30\text{MPa}$ 。

GTS-35-10——黑心可锻铸铁, 抗拉强度 $\geq 35\text{MPa}$, 伸长率 $\geq 10\%$ (旧牌号为 GTS-35)。

GTW-45-07——白心可锻铸铁, 抗拉强度 $\geq 45\text{MPa}$, 伸长率 $\geq 7\%$ (旧牌号为 GTW-45)。

(3) 第二类铸铁牌号的表示方法举例如下:

GGL-NiMn 13 7——片状石墨奥氏体铸铁, 平均含 $w_{\text{Ni}} 13\%$, $w_{\text{Mn}} 7\%$ 。

GGG-NiCr 20 2——球状石墨奥氏体铸铁, 平均含 $w_{\text{Ni}} 20\%$, $w_{\text{Cr}} 2\%$ 。

G-X300NiCr 4 2——抗磨铸铁, 平均含 $w_{\text{C}} 8.00\%$, $w_{\text{Ni}} 4\%$, $w_{\text{Cr}} 2\%$ 。

此外, 前缀字母为: G GK 表示冷硬铸铁; GGZ 表示离心铸铁件。

3. 俄罗斯铸铁牌号表示方法

(1) 灰铸铁牌号用 CЧ××表示 例如 CЧ15 表示 $\sigma_b \geq 150\text{MPa}$ 的灰铸铁。

(2) 球墨铸铁牌号用 BЧ××表示 例如 BЧ35 表示 $\sigma_b \geq 350\text{MPa}$ 的球墨铸铁。

(3) 可锻铸铁牌号用 KЧ××-×表示 例如 KЧ33-8 表示 $\sigma \geq 325\text{MPa}$, $\delta \geq 8\%$ 的可锻铸铁。

(4) 抗磨铸铁牌号 分别用 AЧC-×, AЧB-×, AЧK-×表示。其中 C——灰色片状石墨; B——球状石墨; K——展性团絮状石墨; ×——序号。例如 AXC-5, AЧB-1, AЧK-2 等。

(5) 合金铸铁牌号的前缀字母为 “Ч” 其后表示合金元素及其平均含量, 这种表示方法和合金钢钢号的表示方法基本相同, 但不标出碳含量。例如 ЧX28 为高铬铸铁; ЧГ8Д3 为含铜的高锰铸铁; ЧН2Х 为低镍铸铁。

4. 英国铸铁牌号表示方法

BS 标准中铸铁牌号的表示方法有两类。一类是全部采用数字表示; 另一类是采用前缀字母 (或数字) 加序号表示。现分述如下:

(1) 灰铸铁 牌号采用三位数字表示。例如牌号 150, 表示抗拉强度 $\geq 150\text{MPa}$ 的灰铸铁。

(2) 球墨铸铁 牌号采用分数式表示。例如牌号 700/2, 表示抗拉强度 $\geq 700\text{MPa}$, 伸长率 $\geq 2\%$ 的球墨铸铁。又如牌号 400/18L20, 其中后缀 L20 表示要求在低温 -20°C 时冲击功 $\geq 9\text{J}$ (单个试样) 的附加保证条件, 其余表示方法同上。

(3) 可锻铸铁 牌号采用不同的前缀字母加两组数字表示。采用的字母含义为: B——黑心可锻铸铁; W——白心可锻铸铁; P——珠光体可锻铸铁。前一组数字表示抗拉强度 (σ_b , MPa) $\div 10$, 后一组数字表示伸长率 (δ , %)。例如牌号 W40—05, 表示用标准试样 ($\phi 12\text{mm}$) 测定 $\sigma_b \geq 400\text{MPa}$, $\delta \geq 5\%$ 的白心可锻铸铁。

(4) 抗磨铸铁 牌号采用先数字后字母 (A, B, …E) 表示, 例如 1A。其中数字表示分类, 其含义为: 1——非合金和低合金抗磨铸铁; 2——NiCr 合金抗磨铸铁; 3——高 Cr 抗磨铸铁。后面的字母为顺序代号。

(5) 奥氏体铸铁 牌号采用前缀字母加数字表示, 例如 F1, S2 等。其中字母表示分类,

其含义为：F——片状石墨奥氏体铸铁；S——球状石墨奥氏体铸铁；数字表示序号。

5. 韩国铸铁牌号表示方法

铸铁牌号由字母代号和数字组成。牌号中的主体字母“C”表示铸造制品（Casting），但字母“C”在牌号中的位置并不固定。数字是代表抗拉强度最低值（MPa）。各类铸铁的牌号有：①GC×××表示灰铸铁，例如：GC200，表示 $\sigma_b \geq 200\text{MPa}$ 的灰铸铁。②GCD×××表示球墨铸铁。③MC×××表示可锻铸铁，其中：BMC×××——黑心可锻铸铁；WMC×××——白心可锻铸铁；PMC×××——珠光体可锻铸铁。④SCW×××——CF表示焊接结构用离心铸造铸铁管。

6. 国际标准化组织（ISO）铸铁牌号表示方法

（1）灰铸铁 灰铸铁牌号有两种表示方法。一种是以抗拉强度（MPa）表示，例如Grade100即抗拉强度 $\sigma_b \geq 100\text{MPa}$ 的灰铸铁。另一种是以布氏硬度（HBW）表示，例如H175即布氏硬度平均值为175HBW的灰铸铁。

（2）球墨铸铁 球墨铸铁牌号用“Grade 加抗拉强度—伸长率”下限值表示，例如Grade400—15表示 $\sigma_b \geq 400\text{MPa}$ ， $\delta \geq 15\%$ 的球铁。

（3）可锻铸铁 可锻铸铁分为白心可锻铸铁和黑心可锻铸铁。其牌号前缀字母“W”表示白心，“B”表示黑心，后面用两组数字分别表示抗拉强度和伸长率的下限值（通常采用试棒直径12mm测定的力学性能）。例如W38—12表示 $\sigma_b \geq 380\text{MPa}$ ， $\delta \geq 12\%$ 的白心可锻铸铁；B30—06表示 $\sigma_b \geq 300\text{MPa}$ ， $\delta \geq 6\%$ 的黑心可锻铸铁。

（4）奥氏体铸铁 奥氏体铸铁分为片状石墨奥氏体铸铁和球状石墨奥氏体铸铁，其牌号前缀字母“L”表示片状石墨，“S”表示球状石墨，后面采用所含的主要合金元素符号及其平均含量百分数表示。例如L-NiSiCr30 5 5表示含 $w_{\text{Ni}} 28\% \sim 32\%$ ， $w_{\text{Si}} 5\% \sim 6\%$ ， $w_{\text{Cr}} 4.5\% \sim 5.5\%$ 的片状石墨奥氏体铸铁；S-NiSiCr30 5 5表示球状石墨奥氏体铸铁，其化学成分同上。

7. 日本铸铁牌号表示方法（表3-49）

表 3-49 铸铁和铸钢牌号的字母代号

代号	材料名称	代号	材料名称
D	可锻铸铁管	SCMnCr	结构用高强度锰铬铸钢
DF	可锻铸铁异型管	SCMnCrM	结构用高强度锰铬钼铸钢
DPF	可锻铸铁管	SCMnH	高锰铸钢
FC	灰铸铁	SCMnM	结构用高强度锰钼铸钢
FCD	球墨铸铁	SCNcCrM	结构用高强度镍铬钼铸钢
FCMB	黑心可锻铸铁	SCPH	高温高压用铸钢
FCMP	珠光体可锻铸铁	SCPH-CF	高温高压用离心铸钢管
FCMW	白心可锻铸铁	SCPL	低温低压用铸钢
SC	碳素铸钢	SCS	不锈钢
SCC	结构用高强度碳素铸钢	SCSiMn	结构用高强度硅锰铸钢
SCCrM	结构用高强度低合金铸钢	SCW	焊接结构用铸钢
SCH	耐热铸钢	SCW-CF	焊接结构用离心铸钢管
SCMn	结构用高强度锰铸钢		

3.14 中国和世界主要国家常用钢和合金牌号相似对照 (表 3-50 ~ 表 3-53)

表 3-50 常用钢号对照表

牌号	牌号规格	牌号	牌号规格	牌号	牌号规格	牌号	牌号规格
1. 结构钢		45	GB	S514	BS	SCr440	JIS
08	GB	1045	AISI	3T35	BS	SCr4	旧 JIS
08	ГОСТ	1045	SAE	3T45	BS	SCr4	大同
08F	GB	G10450	UNS	20Mn5	DIN	42C4	NF
08kn	ГОСТ	060A47	BS	1.5053	W-Nr	40Cr4	UNI
15	GB	C45	DIN	20Г2	ГОСТ	50Cr	GB
1015	AISI	Ck45	DIN	SMn420	JIS	5150	AISI
G10150	UNS	1.0503	W-Nr	SMn21	旧 JIS	5150	SAE
1015	SAE	1.1191	W-Nr	SMn2	大同	G51500	UNS
040A15	BS	45	ГОСТ	20M5	NF	~ 735A50	BS
045A15	BS	S45C	JIS	35Mn2	GB	En48	BS
En2E	BS	XC45	NF	1335	AISI	50X	ГОСТ
C15	DIN	C45	UNI	1335	SAE	50C4	NF
Ck15	DIN	60	GB	G13350	UNS	12CrMo	GB
1.0401	W-Nr	1060	AISI	150M36	BS	~ 4119	SAE
1.1141	W-Nr	1060	SAE	En15	BS	1501-620Cr.B	BS
15	ГОСТ	G10600	UNS	En15A	BS	13CrMo44	DIN
S15C	JIS	060A62	BS	36Mn5	DIN	1.7335	W-Nr
XC12	NF	C60	DIN	1.5067	W-Nr	12XM	ГОСТ
C16	UNI	Ck60	DIN	35Г2	ГОСТ	12CD4	NF
20	GB	1.0601	W-Nr	35M2	NF	15CrMo	GB
1020	AISI	1.1221	W-Nr	35SiMn	GB	A-387Cr.B	ASTM
1020	SAE	60	ГОСТ	37MnSi5	DIN	1653	BS
040A20	BS	SWRH4B	JIS	1.5122	W-Nr	16CrMo44	DIN
050A20	BS	C60	NF	35Г	ГОСТ	1.7337	W-Nr
En2C	BS	XC60	NF	38MS5	NF	15XM	ГОСТ
En2D	BS	C60	UNI	35MS5	UNI	STT42 <<	JIS
C22	DIN	20Mn	GB	20Cr	GB	STB42 <<	JIS
Ck22	DIN	1022	SAE	5120	AISI	STC42 <<	JIS
1.0402	W-Nr	C1022	AISI	5120	SAE	12CD4 <<	NF
1.1151	W-Nr	G10220	UNS	G51200	UNS	14CrMo3	UNI
20	ГОСТ	080A20	BS	527A19	BS	14CrMo45	UNI
S20C	JIS	4S21	BS	527A20	BS	20CrMo	GB
CC20	NF	20Г	ГОСТ	20Cr4	DIN	4118	AISI
C20	UNI	40Mn	GB	20X	ГОСТ	4118	SAE
35	GB	C1036	AISI	SCr420	JIS	4119	SAE
1035	AISI	1036	SAE	SCr22	旧 JIS	G41180	UNS
1035	SAE	080A40	BS	18C3	NF	CDS12	BS
G10350	UNS	1045	BS	40Cr	GB	CDS110	BS
060A35	BS	40Mn4	DIN	5140	AISI	20CrMo5	DIN
S93	BS	1.5038	W-Nr	5140	SAE	1.7264	W-Nr
C35	DIN	40Г	ГОСТ	G51400	UNS	20XM	ГОСТ
Ck35	DIN	20Mn2	GB	530A40	BS	SCM420	JIS
1.0501	W-Nr	1320	AISI	530M40	BS	SCM22	旧 JIS
1.1181	W-Nr	1320	SAE	En18	BS	SCM22	大同
35	ГОСТ	1321	AISI	S117	BS	SCM22	日新
S35C	JIS	1321	SAE	41Cr4	DIN	18CD4	NF
XC38	NF	~ 150M19	BS	40X	ГОСТ		
C35	UNI	En14A	BS				
		S92	BS				

(续)

牌号	牌号规格	牌号	牌号规格	牌号	牌号规格	牌号	牌号规格
35CrMo	GB	30Cr2MoV	YB 旧	36CrNiMo4	DIN	55Si2Mn	GB
E4135	AISI	~ En40C	BS	1.6511	W-Nr	9255	AISI
E4132	AISI	S106	BS	40XHM	ГОСТ	9255	SAE
G41350	UNS	30CrMoV9	DIN	SNCM439	JIS	92550	UNS
780A37	BS	1.7707	W-Nr	SNCM8	旧 JIS	250A53	BS
En19B	BS	~ 25X2MΦ	ГОСТ	35NCD5	NF	En45	BS
CDS13	BS	~ 3H10	TY	~ 36NCD6	NF	1429	BS
34CrMo4	DIN	30CD12	NF	38NiCrMo4	UNI	55Si7	DIN
1.7220	W-Nr	30CrMo12	UNI	40CrMnMo	GB	1.0904	W-Nr
35XM	ГОСТ	12CrNi2	GB	~ 4142	AISI	55C2	ГОСТ
SCM435	JIS	14NiCr10	DIN	~ 4142	SAE	55S7	NF
SCM3	旧 JIS	1.5732	W-Nr	~ G41420	UNS	55Si8	UNI
SCM3	大同	12XH2A	ГОСТ	708A42	BS	60Si2Mn	GB
35CD4	NF	SNC415	JIS	En19C	BS	9260	AISI
35CrMo4	UNI	SNC21	旧 JIS	40XGM	ГОСТ	9260	SAE
42CrMo	GB	SNC21	大同	38XGM	ГОСТ	G92600	UNS
4140	AISI	12CrNi3	GB	2. 弹簧钢		250A58	BS
4140	SAE	E3310	AISI	65	GB	250A61	BS
G41400	UNS	3310	SAE	C1065	AISI	En45A	BS
708M40	BS	G33106	UNS	1065	SAE	60SiMn6	DIN
En19A	BS	655M13	BS	G10650	UNS	0908	W-Nr
42CrMo4	DIN	En36A	BS	080A67	BS	60Cr	ГОСТ
1.7225	W-Nr	En36B	BS	En43E	BS	SUP6	JIS
SCM4	旧 JIS	S107	BS	CK67	DIN	SUP6	大同
SCM4	大同	14NiCr14	DIN	1.1231	W-Nr	3. 轴承钢	
SCM4	日新	1.5752	W-Nr	65	ГОСТ	GCr6	YB9-68
42CD4	NF	12XH3A	ГОСТ	SUP2	JIS	E50100	AISI
40CrMo4	UNI	SNC815	JIS	SWR7	JIS	52100	SAE
4150	AISI	SNCC22	旧 JIS	XC65	NF	FSE50100	FS
4150	SAE	14NC12	NF	65Mn	GB	105Cr2	DIN
G41500	UNS	12Cr2Ni4	GB	C1065	AISI	1.3501	W-Nr
~ 708A42	BS	2515	AISI	1065	SAE	11X6	ГОСТ
En19C	BS	2515	SAE	G10650	UNS	~ 100C3	NF
50CrMo4	DIN	659M15	BS	080A67	BS	GCr9	YB9-68
1.7228	W-Nr	2S82	BS	En43E	BS	E51100	AISI
40B	GB	En39A	BS	65Г	ГОСТ	51100	SAE
~ TS14B35	AISI	En39B	BS	50Si2Mn	GB	FSE51100	FS
40MnB	GB	14CrNi18	DIN	51S17	DIN	~ En31	BS
~ TS14B35H	AISI	1.5860	W-Nr	1.0903	W-Nr	105Cr4	DIN
38CrMoAl	GB	12X2H4A	ГОСТ	50C2	ГОСТ	1.3503	W-Nr
6470E	AMS	~ NC71	大同	50S7	NF	11X9	ГОСТ
905M39	BS	12NC15	NF	50Si7	UNI	SUJ1	JIS
En41B	BS	40CrNiMo	GB			SUJ1	大同
34CrAlMo5	DIN	4340	AISI			100C5	NF
1.8507	W-Nr	4340	SAE				
38XMIOA	ГОСТ	G43400	UNS				
SACM645	JIS	815M40	BS				
SACM1	旧 JIS	En110	BS				
45CAD6-12	NF	S118	BS				
38CrAlMo7	UNI	S95	BS				

(续)

牌号	牌号规格	牌号	牌号规格	牌号	牌号规格	牌号	牌号规格
GCr15	YB9-68	C100W2	DIN	100Cr6	DIN	T31502	UNS
E52100	AISI	1.1640	W-Nr	1.2060	W-Nr	B02	BS
52100	SAE	1.1645	W-Nr	1.2067	W-Nr	90MnV8	DIN
FSE52100	FS	Y10	ГОСТ	9Cr2	GB	1.2842	W-Nr
534A99	BS	SK3	JIS	BL3	BS	90MV8	NF
En31	BS	YK3	大同	85Cr7	DIN	88MnV8KU	UNI
100Cr6	DIN	C3	日立	1.2064	W-Nr	CrWMn	GB
1.3505	W-Nr	C98KU	UNI	9X	ГОСТ	105WCr6	DIN
ШХ15	ГОСТ	T10A	YB	Y100C6 ~	NF	1.2419	W-Nr
SUJ2	JIS	W110Special	AISI	W	GB	XBT	ГОСТ
SUJ2	大同	W110Special	SAE	F1	AISI	SKS31	JIS
100C6	NF	T72301	UNS	T60601	UNS	G031	大同
100C6	UNI	C100W1	DIN	BF1 ~	BS	100WCrKU	UNI
GCr15SiMn	YB9-68	C105W1	DIN	120W4	DIN	5CrMnMo	GB
100CrMn6	DIN	1.1540	W-Nr	1.2414	W-Nr	VIG	ASTM
1.3520	W-Nr	1.1545	W-Nr	B1	ГОСТ	40CrMnMo7 ~	DIN
ШХ15CT	ГОСТ	Y10A	ГОСТ	100WC10	NF	1.2311 ~	W-Nr
4. 碳素工具钢		T12	GB	115W4KU	UNI	5XFM	ГОСТ
T7	GB	W112Commercial	AISI	4CrW2Si	GB	SKT5	JIS
C70W2	DIN	W112Commercial	SAE	4XB2C	ГОСТ	5CrNiMo	GB
1.1620	W-Nr	T72302	UNS	40W20KU	UNI	L6 ~	AISI
Y7A	ГОСТ	BW1C	BS	5CrW2Si	GB	L6 ~	SAE
Y ₃ 65	NF	C110W2	DIN	BS1	BS	T61206	UNS
T8	GB	C115W2	DIN	5XB2C	ГОСТ	55NiCrMoV6	DIN
W108Commercial	AISI	1.1650	W-Nr	SKS41 ~	JIS	1.2713	W-Nr
W108Commercial	SAE	1.1654	W-Nr	GS41 ~	大同	5XHM	ГОСТ
T72302	UNS	Y12	ГОСТ	45WC20	NF	SKT4	JIS
C80W2	DIN	SK2	JIS	Cr12	GB	GF4	大同
1.1625	W-Nr	YK2	大同	BD3	BS	55NCDV7	NF
Y8	ГОСТ	Y ₂ 120	NF	X210Cr12	DIN	52NiCrMo6KU	UNI
Y ₂ 75	NF	C112KU	UNI	1.2080	W-Nr	3Cr2W8V	GB
C85KU	UNI	T12A	YB	X12	ГОСТ	H21	AISI
T8A	YB	W112Special	AISI	Z200C12	NF	H21	SAE
W108Special	AISI	W112Special	SAE	X210Cr13KU	UNI	T20821	UNS
W108Special	SAE	T72301	UNS	Cr12MoV	GB	BH21	BS
T72301	UNS	C110W1	DIN	D2 ~	AISI	X30WCrV9-3	DIN
C80W1	DIN	1.1550	W-Nr	D2 ~	SAE	1.2581	W-Nr
C85W1	DIN ≥	Y12A	ГОСТ	T30402	UNS	3X2B8Φ	ГОСТ
1.1525	W-Nr	Y ₁ 120	NF	BD2	BS	SKD5	JIS
1.1530	W-Nr	5. 合金工具钢		X165CrMoV	DIN	DH5	大同
Y8A	ГОСТ	9SiCr	GB	1.2601	W-Nr	Z30WCV9	NF
Y ₁ 75	NF	90CrSi5	DIN	X12M	ГОСТ	X28W09KU	UNI
T10	GB	1.2108	W-Nr	SKD11	JIS	H11	AISI
W110Commercial	AISI	9XC	ГОСТ	DC11	大同	H11	SAE
W110Commercial	SAE	Cr2	GB	Z200CD12	NF	T20811	UNS
T72302	UNS	L3	AISI	9Mn2V	GB	BH11	BS
BW1B	BS	L3	SAE	O2 ~ W	AISI	X38CrMoV51	DIN
C105W2	DIN	T61203	UNS	O2 ~ W	SAE	1.2343	W-Nr
		105Cr5	DIN			4X5MΦC	ГОСТ

(续)

牌号	牌号规格	牌号	牌号规格	牌号	牌号规格	牌号	牌号规格
7MnSi2	YB	W12Cr4V4Mo	YB	S18-1-2-5	DIN	7. 不锈钢耐热钢	
S4 ~	AISI	S12-1-4	DIN	1.3255	W-Nr	1Cr13	GB
S4 ~	SAE	1.3302	W-Nr	P18K5Φ2	ГОСТ	403	AISI
T41904	UNS	P9Φ5	ГОСТ	SKH10	JIS	S40300	UNS
70Si7	DIN	P14Φ4	ГОСТ	VH10	大同	410S21	BS
1.2823	W-Nr	ЭH706	ГОСТ	~ XVC3	日立	En56A	BS
(3Cr5MoW8V)		XVC1	日立	18-0-1-5	NF	S61	BS
H12	AISI	12-0-4	NF	X78WCo1805KU	UNI	X10Cr13	DIN
H12	SAE	~ T12	AISI	T6	AISI	1.4006	W-Nr
T20812	UNS	~ T12	SAE	T6	SAE	12X13	ГОСТ
BH12	BS	S12-1-2	DIN	T12006	UNS	SUS403	JIS
X37Cr-MoW51	DIN	D	DIN	BT6	BS	Z12C13	NF
1.2606	W-Nr	1.3318	W-Nr	S18-1-2-15	DIN	X12Cr13	UNI
Z38CDWV5	NF	12-2-2	NF	1.3257	W-Nr	2Cr13	GB
X35CrMoW05KU	UNI	T2	AISI	SKH4B	JIS	420	AISI
6. 高速工具钢		T2	SAE	WH4B	大同	512100	SAE
W18Cr4V	YB12-77	T12002	UNS	Z85WK18-16	NF	S42000	UNS
T1	AISI	BT2	BS	M1	AISI	420S29	BS
T1	SAP	C18	旧 DIN	M1	SAF	420S37	BS
T12001	UNS	1.3357	W-Nr	T11301	UNS	En56B	BS
BT1	BS	P18Φ2	ГОСТ	BM1	BS	En56C	BS
S18-0-1	DIN	~ HXV2	日立	S2-9-1	DIN	S62	BS
B18	旧 DIN	18-0-2	NF	BMo9	旧 DIN	X20Cr13	DIN
1.3355	W-Nr	X82WV18KU	UNI	1.3346	W-Nr	1.4021	W-Nr
P18	ГОСТ	T8	AISI	2-8-2	NF	20X13	ГОСТ
PΦ1	ГОСТ	T8	SAE	X82MoW09KU	UNI	SUS420J1	JIS
SKH2	JIS	T12008	UNS	W6Mo5Cr4V2	YJG	SUS22	大同
WH2	大同	ECo5	旧 DIN	M2	AISI	SUS22	日立
HX2	日立	1.3251	W-Nr	M2	SAF	Z20C13	NF
KW1	神钢	P9K5	ГОСТ	T11302	UNS	X20Cr13	UNI
SKH2	东北	ЭH705	ГОСТ	BM2	BS	4Cr13	GB
HSK0	不二越	X00	日立	S6-5-2	DIN	X40Cr13	DIN
SKH2	不二越	T15	AISI	DMo5	旧 DIN	1.4034	W-Nr
18-0-1	NF	T15	SAE	1.3343	W-Nr	40X13	ГОСТ
X75W18KU	UNI	T12015	UNS	P6M5	ГОСТ	Z40C13	NF
W9Cr4V2	YB	BT15	BS	SKH9	JIS	X40Cr14	UNI
T7	AISI	S12-1-4-5	DIN	SKH51	JIS	1Cr17	GB
T7	SAE	1.3202	W-Nr	6-5-2	NF	430	AISI
S9-1-2	DIN	P10K5Φ5	ГОСТ	X82WMo0605KU	UNI	51430	SAE
1.3316	W-Nr	SKH10	JIS	M3	AISI	S43000	UNS
P9	ГОСТ	VH10	大同	M3	SAE	430S15	BS
ЭH262	ГОСТ	~ XVC3	日立	T11323	UNS	En60	BS
YX1	日立	12-0-5-5	NF	S6-5-3	DIN	X8Cr17	DIN
KW	神钢	X150WCoV130505KU	UNI	EMo5V3	旧 DIN	1.4016	W-Nr
SKH6	东北	T4	AISI	1.3344	W-Nr	12X17	ГОСТ
SKH6	不二越	T4	SAE	SKH53	JIS	SUS430	JIS
Z70WD12	NF	T12004	UNS	SKH52	JIS	Z8C17	NF
X88WV08KU	UNI	BT4	BS	6-5-4	NF	Z10C17	NF

(续)

牌号	牌号规格	牌号	牌号规格	牌号	牌号规格	牌号	牌号规格
Z12C18	NF	1Cr18Ni9	GB	SUS321	JIS	SUS32	JIS
X8Cr17	UNI	X12CrNi188	DIN	SUS29	旧 JIS	Z30C13	NF
9Cr18	GB	1.4300	W-Nr	Z10CNT18-11	NF	X30Cr13	UNI
95X18	ГОСТ	Z12CrNi18-10	NF	X6CrNiTi1810	UNI	1Cr17Ni2	GB
SUS4400C	JIS	302	AISI	1Cr18Ni11Nb	GB	431	AISI
9Cr18MoV	GB	30302	SAE	347	AISI	En57	BS
440B	AISI	CF-20	ACI	30347	SAE	431S29	BS
51440B	SAE	S30200	UNS	S34700	UNS	X22CrNi17	DIN
S44003	UNS	302S25	BS	347S17	BS	1X17H2	ГОСТ
X90CrMoV18	DIN	En58A	BS	En58F	BS	SUS44	JIS
1.4112	W-Nr	STA5	BS	En58G ~	BS	Z15CN16-2	NF
SUS440B	JIS	V27	BS	1631BNb	BS	X16CrNi16	UNI
X8CrMo17	UNI	12X18H9	ГОСТ	X10CrNiNb189	DIN	4Cr9Si2	GB
0Cr18Ni9	GB	SUS302	JIS	1.4550	W-Nr	En52	BS
304	AISI	SUS40	旧 JIS	08X18H12B	ГОСТ	X45CrSi9	DIN
30304	SAE	X10CrNi1809	UNI	SUS347	JIS	4X9C2	ГОСТ
CF-8	ACI	1Cr18Ni9Ti	GB	SUS43	旧 JIS	SUH1	JIS
S30400	UNS	321	AISI	Z6CNNb18-10	NF	Z45CS9	NF
En58E	BS	30321	SAE	X8CrNiNb1811	UNI	4Cr14Ni14W2Mo	GB
304S15	BS	S32100	UNS	25Cr12WMoV	上钢五厂	5700A	AMS
X5CrNi189	DIN	321S20	BS	616	AISI	4X14H14B2M	ГОСТ
1.4301	W-Nr	En58B	BS	~ 04H802	ГОСТ	SUH4	JIS
04X18H10	ГОСТ	En58C	BS	3Cr13	GB	4Cr10Si2Mo	GB
SUS304	JIS	S110	BS	En56M	BS	4X10C2M	ГОСТ
SUS27	旧 JIS	X10CrNiTi189	DIN	420S45	BS	SUH3	JIS
Z6CN18-10	NF	1.4541	W-Nr	30X13	ГОСТ	Z45CSD10	NF
X5CrNi1810	UNI	12X18H9T	ГОСТ				

表 3-51 世界各国主要钢铁企业名称、代号

代号	企业名称	代号	企业名称
5CB	(中国) 上钢五厂标准	GB.2	Arthur Balfour & Co.Ltd.
ACOS	(ACOS) Acos Villares S.P.		(英国) 鹰立球钢铁公司
	(巴西) 阿可斯-维勒瑞斯厂	GB.3	C.R.Denton Steel & Tool Co.Ltd.
ALG	The Algoma Steel Corporation, Ltd.		(英国) 旦顿钢与工具有限公司
	(加拿大) 阿尔戈马钢铁公司	GB.4	Thos.Firth & John Brown Ltd.
ARM	Armco Steel Corporation		(英国) 佛思-布朗公司
	(美国) 阿姆柯钢铁公司	GB.5	Jonas & Colver (NOVO) Ltd.
BETH	Bethehem Steel Corporation		(英国) 乔纳斯-考维公司
	(美国) 伯利恒钢铁公司	GB.6	Brown Bayley Steel Ltd. (英国) 贝雷钢公司
BR.	Brazil 巴西钢号	GB.7	Samuel Fox and Co.Ltd. (英国) 弗克斯公司
DEW	Deutsche Edelstahlwerke A.G.	GB.8	Wm.Jessop and Sons Ltd. (英国) 杰舍父子公司
	(德国) 德意志特殊钢公司	GB.9	J.J.Saville and Co.Ltd. (英国) 赛维尔公司
DFS	Dominion Foundries and Steel.Led.	HY	(中国) 大冶钢厂标准
	(加拿大) 多米尼翁铸造和钢铁公司	INL	Inland Steel Company (美国) 内陆钢铁公司
ESC	English Steel Rolling Mill Corporation, Ltd.	INT	Interlake.Inc., Steel Division
	(英国) 轧钢有限公司		(美国) 内湖钢铁分公司
FB	(中国) 抚顺钢厂标准	JL	Jones & Laughlin Steel Corporation
GB.1	Firth Vickers Stainless Steel Ltd.		(美国) 琼斯-劳夫林钢铁公司
	(英国) 佛思-维克斯不锈钢公司	JP.1	新日本制铁株式会社 Nippon Steel Corporation

(续)

代号	企业名称	代号	企业名称
JP.3	川崎制铁技术水平式会社 Kawasaki Steel Corporation	PHO	Phoenix Steel Corporation (美国)
JP.7	大同特殊钢株式会社 Daido Steel Co. Ltd.	POLDI	Poldi Steel Work (捷克斯洛伐克) 波罗地钢厂
JP.8	三洋特殊制钢株式会社 Sanyo Special Steel Co. Ltd.	Q/LB	(中国) 大连钢厂标准
JP.9	爱如制钢株式会社 Aichi Steel Works Ltd.	QB	(中国) 齐齐哈尔钢厂标准
JP10	日本高周波钢业株式会社 The Nippon Koshuha Steel Co. Ltd.	QG	(中国) 抚顺钢厂标准 (试行)
K	Kaiser Steel Corporation (美国) 凯泽钢铁公司	REP	Republic Steel Corporation (美国) 共和钢铁公司
LUK	Lukens Steel Co. (美国) 卢肯斯钢铁公司	SHA	Sharon Steel Corporation (美国) 沙伦钢铁公司
LX	(中国) 大连钢厂协议	SKF	Svenska Kullager Fabriken 瑞典 SKF 公司
MCL	Mclouth Steel Corporation (美国) 麦克劳斯钢铁公司	STE	(Steco) The Steel Company of Canada Ltd. 加拿大钢铁公司
NAT	National Steel Corporation (美国) 国家钢铁公司	SWB	Stahl Werke Bochum AG. (德国) 勃西曼工厂
NL.	Netheral de 荷兰钢号	USS	United States Steel Corporation 美国钢铁公司
NO.	Norway 挪威钢号	UG	S. A. Usines Gileon La Croyère (比利时) 吉尔森工厂
ORE	Oregon Steel Mills, Division of Gilimore Steel Corporation (美国) 吉尔摩钢铁公司所属俄勒茂钢分公司	WP	Wheeling Pittsburgh Steel Corporation (美国) 惠林-匹兹堡钢铁公司
		YST	Youngstown Sheet and Tube Company (美国) 扬斯敦板管公司

表 3-52 航空用结构钢, 不锈钢相似牌号对照表

序号	中国		俄罗斯	美国	法国	日本	英国
	现在	曾用					
1	08, 08F		08, 08KII	1008		S09CK	040A04, 050A04
2	10, 10F, ML10		10	1010	XC10, C10	S10C	040A10, 045A10, En2A
3	15, 15F, ML15		15	1015	XC12	S15C	040A15, 045A15, En2E
4	20, 20F, 20A, 18A, ML20		20	1020	XC20	S20C	040A20, 050A20, En2C, En2D
5	25 ML25		25	1025	XC25	S25C	060A25, En4, En4A
6	45 ML46		45	1045	XC45	S45C	060A47
7	15CrA		15XA	5115	12C3	SCr415	523A14, En206
8	20CrA		20XA	5120	18C3	SCr420	527A20
9	12CrNi3A		12XH3A	3310, E3310	14NC12	SNC815	65M13, En36A S107 En36B
10	12Cr2Ni4A		12X2H4A	2515	12NC15		659M15, En39A, 2582 En39B
11	14CrMnSiNi2MoA		14XICH2MA				
12	18Cr2Ni4WA		18XHBA				
13	38CrMoAlA		38XMJOA	6470E	45CAD6-12	SACM645	905M39, En418
14	20Mn2A		20ΓA	1320, 1321	20M5	SMn420	3514, 3T35, 3T45, En14A, S92
15	15CrMnMoVA				15CDV6		

(续)

序号	中国		俄罗斯	美国	法国	日本	英国
	现在	曾用					
16	20CrNi3A	GC-11	20XH3A		20NNC11		
17	18Mn2CrMoBA						
18	30CrMoA		30XMA	4130		SCM430	CDSB
19	30CrMnSiA		30XΓCA				
20	30CrNi4MoA				30NCD16		
21	37CrNi3A		37XH3A		35NC15	SNC3	
22	38CrA		38xA	5140	38C4	SCr440M	530A40
23	40CrA		40XA	5140	42C4	SCr440	En18, 530AM40, S117, 530A40
24	40CrVA		40XΦA	6140			
25	40CrNiMoA		40XHMA	4340	36NCD5	SNCM439	En110, S95, S118, 815M40
26	30CrMnSiNi2A	GC-19	30XΓCHA				
27	35Cr2Ni4MoA				35NCD16 E35NCD16		
28	38Cr2Mo2VA						
29	40CrMnSiMoVA						
30	40CrNi2Si2MoVA			300M, 4340M			
31	70		70	1070	XC70		060A72, 070A72
32	65Mn		65Γ	1065			080A67, En43E
34	50CrVA		50XΦA	6150	50CV	SUP10	735A50, En47
35	32Mn2Si2MoA		KBK-2				
36	32CrNi2MoTiA		AB-548				
37	GCr-9	M50	ИХХ9	51109	100C5	SUJ1	
38	GCr15		ИХХ15	52100	100C6	SUJ2	En31
39	Cr4Mo4V			M50	80DCV42106	QMH5 KDM5	
40	CrMnW		XBF			SKS31	
41	CrW5		XB5			SKS1	
42	ZG22CrMnMo	ZG8		4112		SCrM	
43	ZG25CrMnSiMo	ZG18	27XΓCHAA				
44	ZG27CrMnSiNi		27XΓCHA	4330			
45	ZG28CrMnSiNi2		30XΓCHA	4330			
46	ZG35CrMnSi		35XΓCA			SCSiMnCr3	
47	1Cr13		1X13	403, S40300	Z12C13	SUS403	410S21, En56A, S61
48	2Cr13		2X13	420, S42000	Z20C13	SUS420	420S29, En568, S62
49	3Cr13		3X13	420	Z30C13	SUS 420J2	420S45, En560
50	4Cr13		4X13		Z40C13		

(续)

序号	中国		俄罗斯	美国	法国	日本	英国
	现在	曾用					
51	1Cr17Ni2	GX-8	X17H2	AISI 431	Z15CH16-2	SUS 431	En57
52	1Cr11Ni2W2MoV		ЭИ961	616	Z12CNDV12	SUH616	H46
53	1Cr12Ni2WMoVNB						
54	4Cr10Si2Mo		ЭИ107		Z15CSD10	SUH3	
55	9Cr18		ЭИ229, 9X18	440C		SUS440C	
56	9Cr18MoV						
57	3Cr13Ni7Si2		ЭИ72			SUH3	
58	0Cr16Ni6		07X16116				
59	0Cr17Ni4Cu4Nb			17-4PH AISI630	Z6CNU17-04	SUS630	
60	0Cr17Ni7Al		09X17H7Ю	17-7PH AISI631		SUS631	
61	0Cr15Ni7Mo2Al			PH15-7Mo			
62	0Cr18Ni9		ЭЯ0	AISI304	Z6CH18-09	SUS304	304S15
63	1Cr18Ni9		ЭЯ1	AISI302	Z10CN18-09	SUS302	302S25
64	1Cr18Ni9Ti		ЭЯ1Т	AISI321	Z10CNT18-11	SUS321	321S20
65	2Cr18Ni9		ЭЯ2				
66	2Cr18Ni8W2		ЭИ946				
67	1Cr17Mn14Ni		X14Г4Н				
68	1Cr14Mn14Ni3Ti		ЭИ711				
69	1Cr18Mn8Ni5N		X17Г9Н4А	AISI202			
70	2Cr13Mn9Ni4		ЭИ100				
71	1Cr23Ni18	GX-2	ЭИ417	AISI310		SUH310	310S24
72	4Cr14Ni4W2Mo		ЭИ69	SAEEV9		SUH31	B31S42
73	1Cr19Ni11Si4AlTi		ЭИ654				
74	1Cr21Ni5Ti		ЭИ811				
75	ZGCr17Ni3		ЭИ268А				
76	ZG1Cr11Ni2WMoV		ЭИ961А				
77	ZG0Cr17Ni4Cu3Nb			17-4PH		SUS24	

表 3-53 航空用高温合金相似牌号对照表

序号	中国(曾用名)		美国	英国	法国	俄罗斯
1	GH1015	(GH15)				
2	GH1016	(GH16)				
3	GH1035	(GH35)				ЭИ703 ЭИ126 ВЖ100

(续)

序号	中国(曾用名)		美国	英国	法国	俄罗斯
4	GH1131	(GH131)				
5	HG1140	(GH140)				
6	HG1334					
7	GH2018	(GH18)				
8	GH2036	(GH36)				ЭИ481
9	GH2038					
10	GH2130	(GH130)				
11	GH2132	(GH132)	A286		Z6NCT25	
12	GH2135	(GH135)(808)				
13	GH2136		V57			
14	GH2150	(GH150)				ЭИ718
15	GH2302	(GH302)(K32)				
16	GH3030	(GH30)				ЭИ135
17	GH3039	(GH39)				ЭИ602
18	GH3044	(GH44)				ЭИ868
19	GH3128	(GH128, 红星 11 号)				
20	GH4032					
21	GH4033	(GH33)				ЭИ437Б
22	GH4037	(GH37)				ЭИ617
23	GH4043	(GH43)				ЭИ598
24	GH4049	(GH49, 212)				ЭИ929
25	GH4099	(GH99)				ЭИ99
26	GH4133	(GH33A)				
27	GH4163	(GH163)		Nimonic263, C263	NCK20D	
28	GH4169	(GH169)	Inconel, 718		NC19-FeNb	
29	GH4220	(GH220)				ЭИ220ВД
30	GH4698	(GH698)				ЭИ698
31	K211	(K11)				BA7-45У
32	K214	(K14)				
33	K401	(K1)				АНВ-300
34	K403	(K3)				ЖС6К
35	K405	(K5)				
36	K406	(K6)	GMR-235D			ВЖА-8
37	K412	(K12)				ЖС-3
38	K417	(K17)(M17)	IN100			
39	K418	(K18)	INCO713C			
40	K419	(K19)(518)				

第 4 章 金属和合金材料的化学成分和性能

4.1 国产常用钢种化学成分(表 4-1 ~ 表 4-19)

表 4-1 普通碳素结构钢(GB/T700—1988)

牌号	等级	化学成分(质量分数)(%)					脱氧方法
		C	Mn	Si	S	P	
				不大于			
Q195	—	0.06 ~ 0.12	0.25 ~ 0.50	0.30	0.050	0.045	F、b、Z
Q215	A	0.09 ~ 0.15	0.25 ~ 0.55	0.30	0.050	0.045	F、b、Z
	B				0.045		
Q235	A	0.14 ~ 0.22	0.30 ~ 0.65 ^①	0.30	0.050	0.045	F、b、Z
	B	0.12 ~ 0.20	0.30 ~ 0.70 ^①		0.045		
	C	≤0.18	0.35 ~ 0.80		0.040	0.040	Z
	D	≤0.17			0.035	0.035	TZ
Q255	A	0.18 ~ 0.28	0.40 ~ 0.70	0.30	0.050	0.045	Z
	B				0.045		
Q275	—	0.28 ~ 0.38	0.50 ~ 0.80	0.35	0.050	0.045	Z

① Q235A·B 级沸腾钢锰含量上限为 0.60%。

表 4-2 优质碳素结构钢(GB/T699—1988)

序号	牌号	化学成分(质量分数)(%)							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
					不大于				
1	08F	0.05 ~ 0.11	≤0.03	0.25 ~ 0.50	0.035	0.035	0.25	0.10	0.25
2	10F	0.07 ~ 0.14	≤0.07	0.25 ~ 0.50	0.035	0.035	0.25	0.15	0.25
3	15F	0.12 ~ 0.19	≤0.07	0.25 ~ 0.50	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
4	08	0.05 ~ 0.12	0.17 ~ 0.37	0.35 ~ 0.65	0.035	0.035	0.25	0.10	0.25
5	10	0.07 ~ 0.14	0.17 ~ 0.37	0.35 ~ 0.65	0.035	0.035	0.25	0.15	0.25
6	15	0.12 ~ 0.19	0.17 ~ 0.37	0.35 ~ 0.65	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
7	20	0.17 ~ 0.24	0.17 ~ 0.37	0.35 ~ 0.65	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
8	25	0.22 ~ 0.30	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
9	30	0.27 ~ 0.35	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
10	35	0.32 ~ 0.40	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
11	40	0.37 ~ 0.45	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
12	45	0.42 ~ 0.50	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25

(续)

序号	牌号	化学成分(质量分数)(%)							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
					不大于				
13	50	0.47 ~ 0.55	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
14	55	0.52 ~ 0.60	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
15	60	0.57 ~ 0.65	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
16	65	0.62 ~ 0.70	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
17	70	0.67 ~ 0.75	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
18	75	0.72 ~ 0.80	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
19	80	0.77 ~ 0.85	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
20	85	0.82 ~ 0.90	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
21	15Mn	0.12 ~ 0.19	0.17 ~ 0.37	0.70 ~ 1.00	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
22	20Mn	0.17 ~ 0.24	0.17 ~ 0.37	0.70 ~ 1.00	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
23	25Mn	0.22 ~ 0.30	0.17 ~ 0.37	0.70 ~ 1.00	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
24	30Mn	0.27 ~ 0.35	0.17 ~ 0.37	0.70 ~ 1.00	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
25	35Mn	0.32 ~ 0.40	0.17 ~ 0.37	0.70 ~ 1.00	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
26	40Mn	0.37 ~ 0.45	0.17 ~ 0.37	0.70 ~ 4.00	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
27	45Mn	0.42 ~ 0.50	0.17 ~ 0.37	0.70 ~ 1.00	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
28	50Mn	0.48 ~ 0.56	0.17 ~ 0.37	0.70 ~ 1.00	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
29	60Mn	0.57 ~ 0.65	0.17 ~ 0.37	0.70 ~ 1.00	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
30	65Mn	0.62 ~ 0.70	0.17 ~ 0.37	0.90 ~ 1.20	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
31	70Mn	0.67 ~ 0.75	0.17 ~ 0.37	0.90 ~ 1.20	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25

表 4-3 易切削结构钢(GB/T8731—1988)

牌号	化学成分(质量分数)(%)						
	C	Si	Mn	S	P	Pb	Ca
Y12	0.08 ~ 0.16	0.15 ~ 0.35	0.70 ~ 1.00	0.10 ~ 0.20	0.08 ~ 0.15	—	—
Y12Pb	0.08 ~ 0.16	≤0.15	0.70 ~ 1.10	0.15 ~ 0.25	0.05 ~ 0.10	0.15 ~ 0.35	—
Y15	0.10 ~ 0.18	≤0.15	0.80 ~ 1.20	0.23 ~ 0.33	0.05 ~ 0.10	—	—
Y15Pb	0.10 ~ 0.18	≤0.15	0.80 ~ 1.20	0.23 ~ 0.33	0.05 ~ 0.01	0.15 ~ 0.35	—
Y20	0.17 ~ 0.25	0.15 ~ 0.35	0.70 ~ 1.00	0.08 ~ 0.15	≤0.06	—	—
Y30	0.27 ~ 0.35	0.15 ~ 0.35	0.70 ~ 1.00	0.08 ~ 0.15	≤0.06	—	—
Y35	0.32 ~ 0.40	0.15 ~ 0.35	0.70 ~ 1.00	0.08 ~ 0.15	≤0.05	—	—
Y40Mn	0.37 ~ 0.45	0.15 ~ 0.35	1.20 ~ 1.53	0.20 ~ 0.30	≤0.05	—	—
Y45Ca	0.42 ~ 0.50	0.20 ~ 0.40	0.60 ~ 0.90	0.04 ~ 0.08	≤0.04	—	0.002 ~ 0.006

表 4-4 低合金结构钢(GB/T1591—1994)

牌号	质量等级	化学成分(质量分数)(%)										
		C	Mn	Si	P	S	V	Nb	Ti	Al	Cr	Ni
Q295	A	0.16	0.80 ~ 1.50	0.55	0.045	0.045	0.02 ~ 0.15	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	—		
	B	0.16	0.80 ~ 1.50	0.55	0.040	0.040	0.02 ~ 0.15	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	—		
Q345	A	0.20	1.00 ~ 1.60	0.55	0.045	0.045	0.02 ~ 0.15	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	—		
	B	0.20	1.00 ~ 1.60	0.55	0.040	0.040	0.02 ~ 0.15	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	—		
	C	0.20	1.00 ~ 1.60	0.55	0.035	0.035	0.02 ~ 0.15	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	0.015		
	D	0.18	1.00 ~ 1.60	0.55	0.030	0.030	0.02 ~ 0.15	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	0.015		
	E	0.18	1.00 ~ 1.60	0.55	0.025	0.025	0.02 ~ 0.15	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	0.015		
Q390	A	0.20	1.00 ~ 1.60	0.55	0.045	0.045	0.02 ~ 0.20	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	—	0.30	0.70
	B	0.20	1.00 ~ 1.60	0.55	0.040	0.040	0.02 ~ 0.20	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	—	0.30	0.70
	C	0.20	1.00 ~ 1.60	0.55	0.035	0.035	0.02 ~ 0.20	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	0.015	0.30	0.70
	D	0.20	1.00 ~ 1.60	0.55	0.030	0.030	0.02 ~ 0.20	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	0.015	0.30	0.70
	E	0.20	1.00 ~ 1.60	0.55	0.025	0.025	0.02 ~ 0.20	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	0.015	0.30	0.70
Q420	A	0.20	1.00 ~ 1.70	0.55	0.045	0.045	0.02 ~ 0.20	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	—	0.40	0.70
	B	0.20	1.00 ~ 1.70	0.55	0.040	0.040	0.02 ~ 0.20	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	—	0.40	0.70
	C	0.20	1.00 ~ 1.70	0.55	0.035	0.035	0.02 ~ 0.20	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	0.015	0.40	0.70
	D	0.20	1.00 ~ 1.70	0.55	0.030	0.030	0.02 ~ 0.20	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	0.015	0.40	0.70
	E	0.20	1.00 ~ 1.70	0.55	0.025	0.025	0.02 ~ 0.20	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	0.015	0.40	0.70
Q460	C	0.20	1.00 ~ 1.70	0.55	0.035	0.035	0.02 ~ 0.20	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	0.015	0.70	0.70
	D	0.20	1.00 ~ 1.70	0.55	0.030	0.030	0.02 ~ 0.20	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	0.015	0.70	0.70
	E	0.20	1.00 ~ 1.70	0.55	0.025	0.025	0.02 ~ 0.20	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	0.015	0.70	0.70

注:表中的 Al 为全铝含量。如化验酸溶铝时,其含量应不小于 0.010%。

表 4-5 合金结构钢(GB/T3077—1999)

钢组号	钢组	序号	牌号	化学成分(质量分数)(%)											RE (加入量)
				C	Si	Mn	Mo	W	Cr	Ni	V	Ti	B	Al	
1	Mn	1	20Mn2	0.17 ~ 0.24	0.17 ~ 0.37	1.40 ~ 1.80									
		2	30Mn2	0.27 ~ 0.34	0.17 ~ 0.37	1.40 ~ 1.80									
		3	35Mn2	0.32 ~ 0.39	0.17 ~ 0.37	1.40 ~ 1.80									
		4	40Mn2	0.37 ~ 0.44	0.17 ~ 0.37	1.40 ~ 1.80									
		5	45Mn2	0.42 ~ 0.49	0.17 ~ 0.37	1.40 ~ 1.80									
		6	50Mn2	0.47 ~ 0.55	0.17 ~ 0.37	1.40 ~ 1.80									
2	MnV	7	20MnV	0.17 ~ 0.24	0.17 ~ 0.37	1.30 ~ 1.60					0.07 ~ 0.12				

(续)

钢组号	钢组	序号	牌号	化学成分(质量分数)(%)												RE (加入量)
				C	Si	Mn	Mo	W	Cr	Ni	V	Ti	B	Al		
3	SiMn	8	27SiMn	0.24 ~ 0.32	1.10 ~ 1.40	1.10 ~ 1.40										
		9	35SiMn	0.32 ~ 0.40	1.10 ~ 1.40	1.10 ~ 1.40										
		10	42SiMn	0.39 ~ 0.45	1.10 ~ 1.40	1.10 ~ 1.40										
4	SiMnMoV	11	20SiMn2MoV	0.17 ~ 0.23	0.90 ~ 1.20	2.20 ~ 2.60	0.30 ~ 0.40				0.05 ~ 0.12					
		12	25SiMn2MoV	0.22 ~ 0.28	0.90 ~ 1.20	2.20 ~ 2.60	0.30 ~ 0.40				0.05 ~ 0.12					
		13	37SiMn2MoV	0.33 ~ 0.39	0.60 ~ 0.90	1.60 ~ 1.90	0.40 ~ 0.50				0.05 ~ 0.12					
5	B	14	40B	0.37 ~ 0.44	0.17 ~ 0.37	0.60 ~ 0.90							0.0005 ~ 0.0035			
		15	45B	0.42 ~ 0.49	0.17 ~ 0.37	0.60 ~ 0.90							0.0005 ~ 0.0035			
		16	50B	0.47 ~ 0.55	0.17 ~ 0.37	0.60 ~ 0.90							0.0005 ~ 0.0035			
6	MnB	17	40MnB	0.37 ~ 0.44	0.17 ~ 0.37	1.10 ~ 1.40							0.0005 ~ 0.0035			
		18	45MnB	0.42 ~ 0.49	0.17 ~ 0.37	1.10 ~ 1.40							0.0005 ~ 0.0035			
7	MnMoB	19	20MnMoB	0.16 ~ 0.22	0.17 ~ 0.37	0.90 ~ 1.20	0.20 ~ 0.30						0.0005 ~ 0.0035			
8	MnVB	20	15MnVB	0.12 ~ 0.18	0.17 ~ 0.37	1.20 ~ 1.60					0.07 ~ 0.12		0.0005 ~ 0.0035			
		21	20MnVB	0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	1.20 ~ 1.60					0.07 ~ 0.12		0.0005 ~ 0.0035			
		22	40MnVB	0.37 ~ 0.44	0.17 ~ 0.37	1.10 ~ 1.40					0.05 ~ 0.10		0.0005 ~ 0.0035			
9	MnTiB	23	20MnTiB	0.17 ~ 0.24	0.17 ~ 0.37	1.30 ~ 1.60						0.04 ~ 0.10	0.0005 ~ 0.0035			
		24	25MnTiBRE	0.22 ~ 0.28	0.20 ~ 0.45	1.30 ~ 1.60						0.04 ~ 0.10	0.0005 ~ 0.0035		0.05	
10	Cr	25	15Cr	0.12 ~ 0.18	0.17 ~ 0.37	0.40 ~ 0.70			0.70 ~ 1.00		—	—				
		26	15CrA	0.12 ~ 0.17	0.17 ~ 0.37	0.40 ~ 0.70			0.70 ~ 1.00		—					
		27	20Cr	0.18 ~ 0.24	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80			0.70 ~ 1.00		—					

(续)

钢组号	钢组	序号	牌号	化学成分(质量分数)(%)											
				C	Si	Mn	Mo	W	Cr	Ni	V	Ti	B	Al	RE (加入量)
		28	30Cr	0.27 ~ 0.34	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80			0.80 ~ 1.10		—				
		29	35Cr	0.32 ~ 0.39	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80			0.80 ~ 1.10		—				
		30	40Cr	0.37 ~ 0.44	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80			0.80 ~ 1.10		—				
		31	45Cr	0.42 ~ 0.49	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80			0.80 ~ 1.10		—				
		32	50Cr	0.47 ~ 0.54	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80			0.80 ~ 1.10		—				
11	CrSi	33	38CrSi	0.35 ~ 0.43	1.00 ~ 1.30	0.30 ~ 0.60			1.30 ~ 1.60		—				
12	CrMo	34	12CrMo	0.08 ~ 0.15	0.17 ~ 0.37	0.40 ~ 0.70	0.40 ~ 0.55		0.40 ~ 0.70						
		35	15CrMo	0.12 ~ 0.18	0.17 ~ 0.37	0.40 ~ 0.70	0.40 ~ 0.55		0.80 ~ 1.10		—				
		36	20CrMo	0.17 ~ 0.24	0.17 ~ 0.37	0.40 ~ 0.70	0.15 ~ 0.25		0.80 ~ 1.10		—				
		37	30CrMo	0.26 ~ 0.34	0.17 ~ 0.37	0.40 ~ 0.70	0.15 ~ 0.25	—	0.80 ~ 1.10	—	—	—	—	—	—
		38	30CrMoA	0.26 ~ 0.33	0.17 ~ 0.37	0.40 ~ 0.70	0.15 ~ 0.25	—	0.80 ~ 1.10	—	—	—	—	—	—
		39	35CrMo	0.32 ~ 0.40	0.17 ~ 0.37	0.40 ~ 0.70	0.15 ~ 0.25	—	0.80 ~ 1.10	—	—	—	—	—	—
		40	42CrMo	0.38 ~ 0.45	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.15 ~ 0.25	—	0.90 ~ 1.20	—	—	—	—	—	—
13	CrMoV	41	12CrMoV	0.08 ~ 0.15	0.17 ~ 0.37	0.40 ~ 0.70	0.25 ~ 0.35	—	0.30 ~ 0.60	—	0.15 ~ 0.30	—	—	—	—
		42	35CrMoV	0.30 ~ 0.38	0.17 ~ 0.37	0.40 ~ 0.70	0.20 ~ 0.30	—	1.00 ~ 1.30	—	0.10 ~ 0.20	—	—	—	—
		43	12Cr1MoV	0.08 ~ 0.15	0.17 ~ 0.37	0.40 ~ 0.70	0.25 ~ 0.35	—	0.90 ~ 1.20	—	0.15 ~ 0.30	—	—	—	—
		44	25Cr2MoVA	0.22 ~ 0.29	0.17 ~ 0.37	0.40 ~ 0.70	0.25 ~ 0.35	—	1.50 ~ 1.80	—	0.15 ~ 0.30	—	—	—	—
		45	25Cr2Mo1VA	0.22 ~ 0.29	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.90 ~ 1.10	—	2.10 ~ 2.50	—	0.30 ~ 0.50	—	—	—	—
14	CrMoAl	46	38CrMoAl	0.35 ~ 0.42	0.20 ~ 0.45	0.30 ~ 0.60	0.15 ~ 0.25	—	1.35 ~ 1.65	—	—	—	—	0.70 ~ 1.10	—

(续)

钢组号	钢组	序号	牌号	化学成分(质量分数)(%)											RE (加入量)
				C	Si	Mn	Mo	W	Cr	Ni	V	Ti	B	Al	
15	CrV	47	40CrV	0.37 ~ 0.44	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	—	—	0.80 ~ 1.10	—	0.10 ~ 0.20	—	—	—	—
		48	50CrVA	0.47 ~ 0.54	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	—	—	0.80 ~ 1.10	—	0.10 ~ 0.20	—	—	—	—
16	CrMn	49	15CrMn	0.12 ~ 0.18	0.17 ~ 0.37	1.10 ~ 1.40	—	—	0.40 ~ 0.70	—	—	—	—	—	—
		50	20CrMn	0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	0.90 ~ 1.20	—	—	0.90 ~ 1.20	—	—	—	—	—	—
		51	40CrMn	0.37 ~ 0.45	0.17 ~ 0.37	0.90 ~ 1.20	—	—	0.90 ~ 1.20	—	—	—	—	—	—
17	CrMnSi	52	20CrMnSi	0.17 ~ 0.23	0.90 ~ 0.12	0.80 ~ 1.10	—	—	0.80 ~ 1.10	—	—	—	—	—	—
		53	25CrMnSi	0.22 ~ 0.28	0.90 ~ 0.12	0.80 ~ 1.10	—	—	0.80 ~ 1.10	—	—	—	—	—	—
		54	30CrMnSi	0.27 ~ 0.34	0.90 ~ 0.12	0.80 ~ 1.10	—	—	0.80 ~ 1.10	—	—	—	—	—	—
		55	30CrMnSiA	2.28 ~ 0.34	0.90 ~ 0.12	0.80 ~ 1.10	—	—	0.80 ~ 1.10	—	—	—	—	—	—
		56	35CrMnSiA	0.32 ~ 0.39	1.10 ~ 1.40	0.80 ~ 1.10	—	—	1.10 ~ 1.40	—	—	—	—	—	—
18	CrMnMo	57	20CrMnMo	0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	0.90 ~ 1.20	0.20 ~ 0.30	—	1.10 ~ 1.40	—	—	—	—	—	—
		58	40CrMnMo	0.37 ~ 0.45	0.17 ~ 0.37	0.90 ~ 1.20	0.20 ~ 0.30	—	0.90 ~ 1.20	—	—	—	—	—	—
19	CrMnTi	59	20CrMnTi	0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	0.80 ~ 1.10	—	—	1.00 ~ 1.30	—	—	0.09 ~ 0.10	—	—	—
		60	30CrMnTi	0.24 ~ 0.32	0.17 ~ 0.37	0.80 ~ 1.10	—	—	1.00 ~ 1.30	—	—	0.09 ~ 0.10	—	—	—
20	CrNi	61	20CrNi	0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	0.40 ~ 0.70	—	—	0.45 ~ 0.75	1.00 ~ 1.40	—	—	—	—	—
		62	40CrNi	0.37 ~ 0.44	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	—	—	0.45 ~ 0.75	1.00 ~ 1.40	—	—	—	—	—
		63	45CrNi	0.42 ~ 0.49	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	—	—	0.45 ~ 0.75	1.00 ~ 1.40	—	—	—	—	—
		64	50CrNi	0.47 ~ 0.54	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	—	—	0.45 ~ 0.75	1.00 ~ 1.40	—	—	—	—	—
		65	12CrNi2	0.10 ~ 0.17	0.17 ~ 0.37	0.30 ~ 0.60	—	—	0.60 ~ 0.90	1.50 ~ 1.90	—	—	—	—	—
		66	12CrNi3	0.10 ~ 0.17	0.17 ~ 0.37	0.30 ~ 0.60	—	—	0.60 ~ 0.90	2.75 ~ 3.15	—	—	—	—	—

(续)

钢组号	钢组	序号	牌号	化学成分(质量分数)(%)											RE (加入量)
				C	Si	Mn	Mo	W	Cr	Ni	V	Ti	B	Al	
		67	20CrNi3	0.17 ~ 0.24	0.17 ~ 0.37	0.30 ~ 0.60	—	—	0.60 ~ 0.90	2.75 ~ 3.15	—	—	—	—	—
		68	30CrNi3	0.27 ~ 0.33	0.17 ~ 0.37	0.30 ~ 0.60	—	—	0.60 ~ 0.90	2.75 ~ 3.15	—	—	—	—	—
		69	37CrNi3	0.34 ~ 0.41	0.17 ~ 0.37	0.30 ~ 0.60	—	—	1.20 ~ 1.60	3.00 ~ 3.50	—	—	—	—	—
		70	12Cr2Ni4	0.10 ~ 0.16	0.17 ~ 0.37	0.30 ~ 0.60	—	—	1.25 ~ 1.65	3.25 ~ 3.65	—	—	—	—	—
		71	20Cr2Ni4	0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	0.30 ~ 0.60	—	—	1.25 ~ 1.65	3.25 ~ 3.65	—	—	—	—	—
21	CrNiMo	72	20CrNiMo	0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	0.60 ~ 0.95	0.20 ~ 0.30	—	0.40 ~ 0.70	0.35 ~ 0.75	—	—	—	—	—
		73	40CrNiMoA	0.37 ~ 0.44	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.15 ~ 0.25	—	0.60 ~ 0.90	1.25 ~ 1.65	—	—	—	—	—
22	CrMnNiMo	74	18CrNiMnMoA	0.15 ~ 0.21	0.17 ~ 0.37	1.10 ~ 1.40	0.20 ~ 0.30	—	1.00 ~ 1.30	1.00 ~ 1.30	—	—	—	—	—
23	CrNiMoV	75	45CrNiMoVA	0.42 ~ 0.49	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.20 ~ 0.30	—	0.80 ~ 1.10	1.30 ~ 1.80	0.10 ~ 0.20	—	—	—	—
24	CrNiW	76	18Cr2Ni4WA	0.13 ~ 0.19	0.17 ~ 0.37	0.30 ~ 0.60	—	0.80 ~ 1.20	1.35 ~ 1.65	4.00 ~ 4.50	—	—	—	—	—
		77	25Cr2Ni4WA	0.21 ~ 0.28	0.17 ~ 0.37	0.30 ~ 0.60	—	0.80 ~ 1.20	1.35 ~ 1.65	4.00 ~ 4.50	—	—	—	—	—

注:稀土分析结果供参考。

表 4-6 合金结构钢中 S、P 及残余 Cu、Cr、Ni 含量的规定

钢类	P	S	Cu	Cr	Ni
	质量分数(%)不大于				
优质钢	0.035	0.035	0.30	0.30	0.30
高级优质钢	0.025	0.025	0.25	0.30	0.30
特级优质钢	0.025	0.015	0.25	0.30	0.30

表 4-7 保证淬透性结构钢(GB/T5216—1985)

序号	钢号	化学成分(质量分数)(%)							
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	B	Ti V
1	45H	0.42 ~ 0.50	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.85					
2	20CrH	0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.85	0.70 ~ 1.10				
3	40CrH	0.37 ~ 0.44	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.85	0.70 ~ 1.10				
4	45CrH	0.42 ~ 0.49	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.85	0.70 ~ 1.10				
4	40MnBH	0.37 ~ 0.44	0.17 ~ 0.37	1.00 ~ 1.40				0.0005 ~ 0.0035	
6	45MnBH	0.42 ~ 0.49	0.17 ~ 0.37	0.95 ~ 1.40				0.0005 ~ 0.0035	

(续)

序号	钢号	化学成分(质量分数)(%)								
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	B	Ti	V
7	20MnMoBH	0.16 ~ 0.22	0.17 ~ 0.37	0.90 ~ 1.25			0.20 ~ 0.30	0.0005 ~ 0.0035		
8	20MnVBH	0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	1.05 ~ 1.50				0.0005 ~ 0.0035		0.07 ~ 0.12
9	22MnVBH	0.19 ~ 0.25	0.17 ~ 0.37	1.25 ~ 1.65				0.0005 ~ 0.0035		
10	20MnTiBH	0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	1.20 ~ 1.55				0.0005 ~ 0.0035	0.04 ~ 0.10	
11	20CrMnMoH	0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	0.85 ~ 1.20	1.05 ~ 1.40		0.20 ~ 0.30			
12	20CrMnTiH	0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	0.80 ~ 1.15	1.00 ~ 1.35				0.04 ~ 0.10	
13	20CrNi3H	0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	0.30 ~ 0.65	0.60 ~ 0.95	2.70 ~ 3.25				
14	12Cr2Ni4H	0.10 ~ 0.17	0.17 ~ 0.37	0.30 ~ 0.65	1.20 ~ 1.75	3.20 ~ 3.75				
15	20CrNiMoH	0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	0.60 ~ 0.95	0.35 ~ 0.65	0.35 ~ 0.75	0.15 ~ 0.25			

表 4-8a 非热处理型冷镦和冷挤压用钢的牌号及化学成分(GB/T6478—2001)

序号	统一数字代号	牌号	化学成分(质量分数)(%)					
			C	Si	Mn	P	S	Alt
1	U40048	ML04Al	≤0.06	≤0.10	0.20 ~ 0.40	≤0.035	≤0.035	≥0.020
2	U40088	ML08Al	0.05 ~ 0.10	≤0.10	0.30 ~ 0.60	≤0.035	≤0.035	≥0.020
3	U40108	ML10Al	0.08 ~ 0.13	≤0.10	0.30 ~ 0.60	≤0.035	≤0.035	≥0.020
4	U40158	ML15Al	0.13 ~ 0.18	≤0.10	0.30 ~ 0.60	≤0.035	≤0.035	≥0.200
5	U40152	ML15	0.13 ~ 0.18	0.15 ~ 0.35	0.30 ~ 0.60	≤0.035	≤0.035	—
6	U40208	ML20Al	0.18 ~ 0.23	≤0.10	0.30 ~ 0.60	≤0.035	≤0.035	≥0.020
7	U40202	ML20	0.18 ~ 0.23	0.15 ~ 0.35	0.30 ~ 0.60	≤0.035	≤0.035	—

注:Alt表示钢中的全铝量。

表 4-8b 表面硬化型冷镦和冷挤压用钢的牌号及化学成分(GB/T6478—2001)

序号	统一数字代号	牌号	化学成分/%						
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Alt
1	U41188	ML18Mn	0.15 ~ 0.20	≤0.10	0.60 ~ 0.90	≤0.030	≤0.035	—	≥0.020
2	U41228	ML22Mn	0.18 ~ 0.23	≤0.10	0.70 ~ 1.00	≤0.030	≤0.035	—	≥0.020
3	A20204	ML20Cr	0.17 ~ 0.23	≤0.30	0.60 ~ 0.90	≤0.035	≤0.035	0.90 ~ 1.20	≥0.020

注:1. 表 4-8a 中序号 3、4、5、6、7 五个牌号也适于表面硬化型钢。

2. Alt 表示钢中的全铝量。

表 4-8c 调质型冷镦和冷挤压用钢(包括含硼钢)的牌号及化学成分(GB/T6478—2001)

序号	统一数字代号	牌号	化学成分(质量分数)(%)						
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	U40252	ML25	0.22 ~ 0.29	≤0.20	0.30 ~ 0.60	≤0.035	≤0.035	—	—
2	U40302	ML30	0.27 ~ 0.34	≤0.20	0.30 ~ 0.60	≤0.035	≤0.035	—	—

(续)

序号	统一数字 代号	牌号	化学成分(质量分数)(%)						
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
3	U40352	ML35	0.32 ~ 0.39	≤0.20	0.30 ~ 0.60	≤0.035	≤0.035	—	—
4	U40402	ML40	0.37 ~ 0.44	≤0.20	0.30 ~ 0.60	≤0.035	≤0.035	—	—
5	U40452	ML45	0.42 ~ 0.50	≤0.20	0.30 ~ 0.60	≤0.035	≤0.035	—	—
6	L20158	ML15Mn	0.14 ~ 0.20	0.20 ~ 0.40	1.20 ~ 1.60	≤0.035	≤0.035	—	—
7	U41252	ML25Mn	0.22 ~ 0.29	≤0.25	0.60 ~ 0.90	≤0.035	≤0.035	—	—
8	U41302	ML30Mn	0.27 ~ 0.34	≤0.25	0.60 ~ 0.90	≤0.035	≤0.035	—	—
9	U41352	ML35Mn	0.32 ~ 0.39	≤0.25	0.60 ~ 0.90	≤0.035	≤0.035	—	—
10	A20374	ML37Cr	0.34 ~ 0.41	≤0.30	0.60 ~ 0.90	≤0.035	≤0.035	0.90 ~ 1.20	—
11	A20404	ML40Cr	0.38 ~ 0.45	≤0.30	0.60 ~ 0.90	≤0.035	≤0.035	0.90 ~ 1.20	—
12	A30304	ML30CrMo	0.26 ~ 0.34	≤0.30	0.60 ~ 0.90	≤0.035	≤0.035	0.80 ~ 1.10	0.15 ~ 0.25
13	A30354	ML35CrMo	0.32 ~ 0.40	≤0.30	0.60 ~ 0.90	≤0.035	≤0.035	0.80 ~ 1.10	0.15 ~ 0.25
14	A30424	ML42CrMo	0.38 ~ 0.45	≤0.30	0.60 ~ 0.90	≤0.035	≤0.035	0.90 ~ 1.20	0.15 ~ 0.25

表 4-8d 调质型冷镦和冷挤压用钢的牌号及化学成分(GB/T6478—2001)

序号	统一数字 代号	牌号	化学成分/%						
			C	Si	Mn	P	S	B	Alt
1	A70204	ML20B	0.17 ~ 0.24	≤0.40	0.50 ~ 0.80	≤0.035	≤0.035	0.0005 ~ 0.0035	≥0.02
2	A70284	ML28B	0.25 ~ 0.32	≤0.40	0.60 ~ 0.90	≤0.035	≤0.035	0.0005 ~ 0.0035	≥0.02
3	A70354	ML35B	0.32 ~ 0.39	≤0.40	0.50 ~ 0.80	≤0.035	≤0.035	0.0005 ~ 0.0035	≥0.02
4	A71154	ML15MnB	0.14 ~ 0.20	≤0.30	1.20 ~ 1.60	≤0.035	≤0.035	0.0005 ~ 0.0035	≥0.02
5	A71204	ML20MnB	0.17 ~ 0.24	≤0.40	0.80 ~ 1.20	≤0.035	≤0.035	0.0005 ~ 0.0035	≥0.02
6	A71354	ML35MnB	0.32 ~ 0.39	≤0.40	1.10 ~ 1.40	≤0.035	≤0.035	0.0005 ~ 0.0035	≥0.02
7	A20378	ML37CrB	0.34 ~ 0.41	≤0.40	0.50 ~ 0.80	≤0.035	≤0.035	0.0005 ~ 0.0035	≥0.02
8	A74204	ML20MnTiB	0.19 ~ 0.24	≤0.30	1.30 ~ 1.60	≤0.035	≤0.035	0.0005 ~ 0.0035	≥0.02
9	A73154	ML15MnVB	0.13 ~ 0.18	≤0.30	1.20 ~ 1.60	≤0.035	≤0.035	0.0005 ~ 0.0035	≥0.02
10	A73204	ML20MnVB	0.19 ~ 0.24	≤0.30	1.20 ~ 1.60	≤0.035	≤0.035	0.0005 ~ 0.0035	≥0.02

注:Alt表示全铝量;测定酸溶铝质量分数不小于0.015%,应认为是符合本标准。

表 4-9 低淬透性含钛优质碳素结构钢(YB/T2009—1981)

序号	钢号	化学成分(质量分数)(%)					
		C	Si	Mn	Ti	P	S
			不大于			不大于	
1	55Ti	0.51 ~ 0.59	0.25	0.23	0.03 ~ 0.10	0.040	0.040
2	60Ti	0.57 ~ 0.65	0.30	0.23	0.03 ~ 0.10	0.040	0.040
3	70Ti	0.64 ~ 0.73	0.35	0.28	0.04 ~ 0.12	0.040	0.040

注:钢中残余铬、镍、铜元素含量 w_{Cr} 、 w_{Ni} 、 w_{Cu} 各不大于0.20%,三者之和不大于0.50%。

表 4-10 弹簧钢(GB/T1222—1984)

序号	钢号	化学成分(质量分数)(%)											
		C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	B	Ni	Cu	P	S
										不大于			
1	65	0.62 ~ 0.70	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	≤ 0.25					0.25	0.25	0.035	0.035
2	70	0.67 ~ 0.75	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	≤ 0.25					0.05	0.25	0.035	0.035
3	85	0.82 ~ 0.90	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	≤ 0.25					0.25	0.25	0.035	0.035
4	65Mn	0.62 ~ 0.70	0.17 ~ 0.37	0.90 ~ 1.20	≤ 0.25					0.25	0.25	0.035	0.035
5	55Si2Mn	0.52 ~ 0.60	1.50 ~ 2.00	0.60 ~ 0.90	≤ 0.35					0.35	0.25	0.035	0.035
6	55Si2MnB	0.52 ~ 0.60	1.50 ~ 2.00	0.60 ~ 0.90	≤ 0.35				0.0005 ~ 0.004	0.35	0.25	0.035	0.035
7	55SiMnVB	0.52 ~ 0.60	0.70 ~ 1.00	1.00 ~ 1.30	≤ 0.35		0.08 ~ 0.16		0.0005 ~ 0.0035	0.35	0.25	0.035	0.035
8	60Si2Mn	0.56 ~ 0.64	1.50 ~ 2.00	0.60 ~ 0.90	≤ 0.35					0.35	0.25	0.035	0.035
9	60Si2MnA	0.56 ~ 0.64	1.60 ~ 2.00	0.60 ~ 0.90	≤ 0.35					0.35	0.25	0.030	0.030
10	60Si2CrA	0.56 ~ 0.64	1.40 ~ 1.80	0.40 ~ 0.70	0.70 ~ 1.00					0.35	0.25	0.030	0.030
11	60Si2CrVA	0.56 ~ 0.64	1.40 ~ 1.80	0.40 ~ 0.70	0.90 ~ 1.20		0.10 ~ 0.20			0.35	0.25	0.030	0.030
12	55CrMnA	0.52 ~ 0.60	0.17 ~ 0.37	0.65 ~ 0.95	0.65 ~ 0.95					0.35	0.25	0.030	0.030
13	60CrMnA	0.56 ~ 0.64	0.17 ~ 0.37	0.70 ~ 1.00	0.70 ~ 1.00					0.35	0.25	0.030	0.030
14	60CrMnMoA	0.56 ~ 0.64	0.17 ~ 0.37	0.70 ~ 1.00	0.70 ~ 0.90	0.25 ~ 0.35				0.35	0.25	0.030	0.030
15	50CrVA	0.46 ~ 0.54	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.80 ~ 1.10		0.10 ~ 0.20			0.35	0.25	0.030	0.030
16	60CrMnBA	0.56 ~ 0.64	0.17 ~ 0.37	0.70 ~ 1.00	0.70 ~ 1.00				0.0005 ~ 0.004	0.35	0.25	0.030	0.030
17	30W4Cr2VA	0.26 ~ 0.34	0.17 ~ 0.37	≤ 0.40	2.00 ~ 2.50		0.50 ~ 0.80	4 ~ 4.5		0.35	0.25	0.030	0.030

注:1. 当用平炉或转炉冶炼时,不带“A”钢的磷、硫含量均不大于 0.040%。

2. 根据需方要求(在合同中注明),钢中残余铜含量不大于 0.20%。

表 4-11 高碳铬轴承钢(YJZ84)

钢号	化学成分(质量分数)(%)					
	C	Si	Mn	Cr	P	S
					不大于	
GCr6	1.05 ~ 1.15	0.15 ~ 0.35	0.20 ~ 0.40	0.40 ~ 0.70	0.025	0.025
GCr9	1.00 ~ 1.10	0.15 ~ 0.35	0.25 ~ 0.45	0.90 ~ 1.20	0.025	0.025
GCr9SiMn	1.00 ~ 1.10	0.45 ~ 0.75	0.95 ~ 1.25	0.90 ~ 1.20	0.025	0.025
GCr15	0.95 ~ 1.05	0.15 ~ 0.35	0.25 ~ 0.45	1.40 ~ 1.65	0.025	0.025
GCr15SiMn	0.95 ~ 1.05	0.45 ~ 0.75	0.95 ~ 1.25	1.40 ~ 1.65	0.025	0.025

表 4-12 渗碳轴承钢(GB/T3203—1982)

序号	牌号	化学成分(质量分数)(%)								
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S
								不大于		
1	G20CrMo	0.17 ~ 0.23	0.20 ~ 0.35	0.65 ~ 0.95	0.35 ~ 0.65	—	0.08 ~ 0.15	0.25	0.030	0.030
2	G20CrNiMo	0.17 ~ 0.23	0.15 ~ 0.40	0.60 ~ 0.90	0.35 ~ 0.65	0.40 ~ 0.70	0.15 ~ 0.30	0.25	0.030	0.030
3	G20CrNi2Mo	0.17 ~ 0.23	0.15 ~ 0.40	0.40 ~ 0.70	0.35 ~ 0.65	1.60 ~ 2.00	0.20 ~ 0.30	0.25	0.030	0.030
4	G20Cr2Ni4	0.17 ~ 0.23	0.15 ~ 0.40	0.30 ~ 0.60	1.25 ~ 1.75	3.25 ~ 3.75	—	0.25	0.030	0.030
5	G10CrNi3Mo	0.08 ~ 0.13	0.15 ~ 0.40	0.40 ~ 0.70	1.00 ~ 1.40	3.00 ~ 3.50	0.08 ~ 0.15	0.25	0.030	0.030
6	G20Cr2Mn2Mo	0.17 ~ 0.23	0.15 ~ 0.40	1.30 ~ 1.60	1.70 ~ 2.00	≤0.30	0.20 ~ 0.30	0.25	0.030	0.030

表 4-13 高碳铬不锈钢轴承钢(GB/T3086—1982)

序号	钢号	化学成分(质量分数)(%)						
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	9Cr18	0.90 ~ 1.10	0.80	0.80	0.035	0.030	1.70	
2	9Cr18Mo	0.95 ~ 1.10	0.80	0.80	0.035	0.030	16.0 ~ 18.0	0.44 ~ 0.70

表 4-14 碳素工具钢(GB/T1298—1986)

序号	钢号	化学成分(质量分数)(%)				
		C	Mn	Si	S	P
					不大于	
1	T7	0.65 ~ 0.74	≤ 0.40	≤ 0.35	0.030	0.035
2	T8	0.75 ~ 0.84	≤ 0.40	≤ 0.35	0.030	0.035
3	T8Mn	0.80 ~ 0.90	0.40 ~ 0.60	≤ 0.35	0.030	0.035
4	T9	0.85 ~ 0.94	≤ 0.40	≤ 0.35	0.030	0.035
5	T10	0.95 ~ 1.04	≤ 0.40	≤ 0.35	0.030	0.035
6	T11	1.05 ~ 1.14	≤ 0.40	≤ 0.35	0.30	0.035
7	T12	1.15 ~ 1.24	≤ 0.40	≤ 0.35	0.030	0.035
8	T13	1.25 ~ 1.35	≤ 0.40	≤ 0.35	0.030	0.035

表 4-15 合金工具钢(GB/T1299—2000)

钢组	序号	钢号	化学成分(质量分数)(%)										
			C	Si	Mn	P	S	Cr	W	Mo	V	Al	其他
						不大于							
量具刃具用钢	1	9SiCr	0.85 ~ 0.95	1.20 ~ 1.60	0.30 ~ 0.60	0.030	0.030	0.95 ~ 1.25					
	2	8MnSi	0.75 ~ 0.85	0.30 ~ 0.60	0.80 ~ 1.10	0.030	0.030						
	3	Cr06	1.30 ~ 1.45	≤ 0.40	≤ 0.40	0.030	0.030	0.50 ~ 0.70					
	4	Cr2	0.95 ~ 1.10	≤ 0.40	≤ 0.40	0.030	0.030	1.30 ~ 1.65					
	5	9Cr2	0.80 ~ 0.95	≤ 0.40	≤ 0.40	0.030	0.030	1.30 ~ 1.70					
	6	W	1.05 ~ 1.25	≤ 0.40	≤ 0.40	0.030	0.030	0.10 ~ 0.30	0.80 ~ 1.20				

(续)

钢组	序号	钢号	化学成分(质量分数)(%)										
			C	Si	Mn	P	S	Cr	W	Mo	V	Al	其他
						不大于							
耐冲击工具用钢	7	4CrW2Si	0.35 ~ 0.45	0.80 ~ 1.10	≤0.40	0.030	0.030	1.00 ~ 1.30	2.00 ~ 2.50				
	8	5CrW2Si	0.45 ~ 0.55	0.50 ~ 0.80	≤0.40	0.030	0.030	1.00 ~ 1.30	2.00 ~ 2.50				
	9	6CrW2Si	0.55 ~ 0.65	0.50 ~ 0.80	≤0.40	0.030	0.030	1.00 ~ 1.30	2.20 ~ 2.70				
	10	6CrMnSi2Mo1	0.50 ~ 0.65	1.75 ~ 2.25	0.60 ~ 1.00	0.030	0.030	0.10 ~ 0.50		0.20 ~ 1.35	0.15 ~ 0.35		
	11	5Cr3Mn1SiMo1V	0.45 ~ 0.55	0.20 ~ 1.00	0.20 ~ 0.90	0.030	0.030	3.00 ~ 3.50		1.30 ~ 1.80	≤0.35		
	冷作模具钢	12	Cr2	2.00 ~ 2.30	≤0.40	≤0.40	0.030	0.030	11.50 ~ 13.00				
13		Cr12Mo1V1	1.40 ~ 1.60	≤0.60	≤0.60	0.030	0.030	11.00 ~ 13.00		0.70 ~ 1.20	≤1.10		Co≤1.00
14		Cr12MoV	1.45 ~ 1.70	≤0.40	≤0.40	0.030	0.030	11.00 ~ 12.50		0.40 ~ 0.60	0.15 ~ 0.30		
15		Cr5Mo1V	0.95 ~ 1.05	≤0.50	≤1.00	0.030	0.030	4.75 ~ 5.50		0.90 ~ 1.40	0.15 ~ 0.50		
16		9Mn2V	0.85 ~ 0.95	≤0.40	1.70 ~ 2.00	0.030	0.030				0.10 ~ 0.25		
17		CrWMn	0.90 ~ 1.05	≤0.40	0.80 ~ 1.10	0.030	0.030	0.90 ~ 1.20	1.20 ~ 1.60				
18		9CrWMn	0.85 ~ 0.95	≤0.40	0.90 ~ 1.20	0.030	0.030	0.50 ~ 0.80	0.50 ~ 0.80				
19		Cr4W2MoV	1.12 ~ 1.25	0.40 ~ 0.70	≤0.40	0.030	0.030	3.50 ~ 4.00	1.90 ~ 2.60	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.10		
20		6Cr4W3Mo2VNb	0.60 ~ 0.70	≤0.40	≤0.40	0.030	0.030	3.80 ~ 4.40	2.50 ~ 3.50	1.80 ~ 2.50	1.80 ~ 1.20		Nb:0.20 ~ 0.35
21		6W6Mo5Cr4V	0.55 ~ 0.65	≤0.40	≤0.60	0.030	0.030	3.70 ~ 4.30	6.00 ~ 7.00	4.50 ~ 5.50	0.70 ~ 1.10		
22		7CrSiMnMoV	0.65 ~ 0.75	0.85 ~ 1.15	0.65 ~ 1.05	0.030	0.030	0.90 ~ 1.20	—	0.20 ~ 0.50	0.15 ~ 0.30		
热作模具钢		23	5CrMnMo	0.50 ~ 0.60	0.25 ~ 0.60	1.20 ~ 1.60	0.030	0.030	0.60 ~ 0.90		0.15 ~ 0.30		
	24	5Cr4W5Mo2V	0.40 ~ 0.50	≤0.40	0.20 ~ 0.60	0.030	0.030	3.80 ~ 4.50	4.50 ~ 5.30	1.70 ~ 2.30	0.80 ~ 1.20		
	25	5CrNiMo	0.50 ~ 0.60	≤0.40	0.50 ~ 0.80	0.030	0.030	0.50 ~ 0.80		0.15 ~ 0.30			Ni1.40 ~ 1.80
	26	3Cr2W8V	0.30 ~ 0.40	≤0.40	≤0.40	0.030	0.030	2.20 ~ 2.70	7.50 ~ 9.00		0.20 ~ 0.50		
	27	5Cr4Mo3SiMnVA1	0.47 ~ 0.57	0.80 ~ 1.10	0.80 ~ 1.10	0.030	0.030	3.80 ~ 4.30		2.80 ~ 3.40	0.80 ~ 1.20	0.30 ~ 0.70	
	28	3Cr3Mo3W2V	0.32 ~ 0.42	0.60 ~ 0.90	≤0.65	0.030	0.030	2.80 ~ 3.30	1.20 ~ 1.80	2.50 ~ 3.00	0.80 ~ 1.20		
	29	5Cr4W5Mo2V	0.40 ~ 0.50	≤0.40	≤0.40	0.030	0.030	3.40 ~ 4.40	4.50 ~ 5.30	1.50 ~ 2.10	0.70 ~ 1.10		

(续)

钢组	序号	钢号	化学成分(质量分数)(%)										
			C	Si	Mn	P	S	Cr	W	Mo	V	Al	其他
						不大于							
热作模具钢	30	8Cr3	0.75 ~ 0.85	≤0.40	≤0.40	0.030	0.030	3.20 ~ 3.80					
	31	4CrMnSiMoV	0.35 ~ 0.45	0.80 ~ 1.10	0.80 ~ 1.10	0.030	0.030	1.30 ~ 1.50		0.40 ~ 0.60	0.20 ~ 0.40		
	32	4Cr3Mo3SiV	0.35 ~ 0.45	0.80 ~ 1.20	0.25 ~ 0.70	0.030	0.030	3.00 ~ 3.75		2.00 ~ 3.00	0.25 ~ 0.75		
	33	4Cr5MoSiV	0.33 ~ 0.43	0.80 ~ 1.20	0.20 ~ 0.50	0.030	0.030	4.75 ~ 5.50		1.10 ~ 1.60	0.30 ~ 0.60		
	34	4Cr5MoSiV1	0.32 ~ 0.45	0.80 ~ 1.20	0.20 ~ 0.50	0.030	0.030	4.75 ~ 5.50		1.10 ~ 1.75	0.80 ~ 1.20		
	35	4Cr5W2VSi	0.32 ~ 0.42	0.80 ~ 1.20	≤0.40	0.030	0.030	4.50 ~ 5.50	1.60 ~ 2.40		0.60 ~ 1.00		
	36	7Mn15Cr2A13V2WMo	0.65 ~ 0.75	≤0.80	14.50 ~ 16.50	0.030	0.030	2.00 ~ 2.50	0.50 ~ 0.80	0.50 ~ 0.80	1.50 ~ 2.00	2.30 ~ 3.30	
塑料模具钢	37	3Cr2Mo	0.28 ~ 0.40	0.20 ~ 0.80	0.60 ~ 1.00	0.030	0.030	1.40 ~ 2.00	—	0.30 ~ 0.55	—	—	Ni0.85 ~ 1.15
	38	3Cr2MnNiMo	0.32 ~ 0.40	0.20 ~ 0.40	1.10 ~ 1.15	0.30	0.30	1.70 ~ 2.20	—	0.25 ~ 0.40	—	—	

注:1.5CrNiMo 钢经供需双方同意钒含量小于 0.20%。

2. 钢中残余铜含量应不大于 0.30%, 铜加镍含量应不大于 0.55%。

3. 钢材或坯的化学成分允许偏差应符合 GB/T222—1984 表 2 的规定。

表 4-16 高速工具钢(GB/T9943—1988)

序号	牌号	化学成分(质量分数)(%)									
		C	Mn	P	S	Si	Cr	V	W	Mo	Co
1	W18Cr4V	0.70 ~ 0.80	0.10 ~ 0.40	≤0.030	≤0.030	0.20 ~ 0.40	3.80 ~ 4.40	1.00 ~ 1.40	17.50 ~ 19.00	≤0.30	—
2	W18Cr4VCo5	0.70 ~ 0.80	0.10 ~ 0.40	≤0.030	≤0.030	0.20 ~ 0.40	3.75 ~ 4.50	0.80 ~ 1.20	17.50 ~ 19.00	0.40 ~ 1.00	4.25 ~ 5.75
3	W18Cr4V2Co8	0.75 ~ 0.85	0.20 ~ 0.40	≤0.030	≤0.030	0.20 ~ 0.40	3.75 ~ 5.00	1.80 ~ 2.40	17.50 ~ 19.00	0.50 ~ 1.25	7.00 ~ 9.50
4	W12Cr4V5Co5	1.50 ~ 1.60	0.15 ~ 0.40	≤0.030	≤0.030	0.15 ~ 0.40	3.75 ~ 5.00	4.50 ~ 5.25	11.75 ~ 13.00	≤1.00	4.75 ~ 5.25
5	W6Mo5Cr4V2	0.80 ~ 0.90	0.15 ~ 0.40	≤0.030	≤0.030	0.20 ~ 0.45	3.80 ~ 4.40	1.75 ~ 2.20	5.50 ~ 6.75	4.50 ~ 5.50	—
6	CW6Mo5Cr4V2	0.95 ~ 1.05	0.15 ~ 0.40	≤0.030	≤0.030	0.20 ~ 0.45	3.80 ~ 4.40	1.75 ~ 2.20	5.50 ~ 6.75	4.50 ~ 5.50	—
7	W6Mo5Cr4V3	1.00 ~ 1.10	0.15 ~ 0.40	≤0.030	≤0.030	0.20 ~ 0.45	3.75 ~ 4.50	2.25 ~ 2.75	5.00 ~ 6.75	4.75 ~ 6.50	—
8	CW6Mo5Cr4V3	1.15 ~ 1.25	0.15 ~ 0.40	≤0.030	≤0.030	0.20 ~ 0.45	3.75 ~ 4.50	2.75 ~ 3.25	5.00 ~ 6.75	4.75 ~ 6.50	—

(续)

序号	牌号	化学成分(质量分数)(%)									
		C	Mn	P	S	Si	Cr	V	W	Mo	Co
9	W2Mo9Cr4V2	0.97 ~ 1.05	0.15 ~ 0.40	≤0.030	≤0.030	0.20 ~ 0.55	3.50 ~ 4.00	1.75 ~ 2.25	1.40 ~ 2.10	8.20 ~ 9.20	
10	W6Mo5Cr4V2Co5	0.80 ~ 0.90	0.15 ~ 0.40	≤0.030	≤0.030	0.20 ~ 0.45	3.75 ~ 4.50	1.75 ~ 2.25	5.50 ~ 6.50	4.50 ~ 5.50	4.50 ~ 5.50
11	W7Mo4Cr4V2Co5	1.05 ~ 1.15	0.20 ~ 0.60	≤0.030	≤0.030	0.15 ~ 0.50	3.75 ~ 4.50	1.75 ~ 2.25	6.25 ~ 7.00	3.25 ~ 4.25	4.75 ~ 5.75
12	W2Mo9Cr4VCo8	1.05 ~ 1.15	0.15 ~ 0.40	≤0.030	≤0.030	0.15 ~ 0.65	3.50 ~ 4.25	0.95 ~ 1.35	1.15 ~ 1.85	9.00 ~ 10.00	7.75 ~ 8.75
13	W9Mo3Cr4V	0.77 ~ 0.87	0.20 ~ 0.40	≤0.030	≤0.030	0.20 ~ 0.40	3.80 ~ 4.40	1.30 ~ 1.70	8.50 ~ 9.50	2.70 ~ 3.30	—
14	W6Mo5Cr4V2Al	1.05 ~ 1.20	0.15 ~ 0.40	≤0.030	≤0.030	0.20 ~ 0.60	3.80 ~ 4.40	1.75 ~ 2.20	5.50 ~ 6.75	4.50 ~ 5.50	Al:0.80 ~1.20

表 4-17 不锈钢棒 (GB/T1220—1992)

序号	牌号	化学成分(质量分数)(%)										
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	其他
奥氏体型												
1	1Cr17Mn6Ni5N	≤0.15	≤1.00	5.50 ~ 7.50	≤0.060	≤0.030	3.50 ~ 5.50	16.00 ~ 18.00	—	—	≤0.25	—
2	1Cr18Mn8Ni5N	≤0.15	≤1.00	7.50 ~ 10.00	≤0.060	≤0.030	4.00 ~ 6.00	17.00 ~ 19.00	—	—	≤0.25	—
3	1Cr18Mn10Ni5Mo3N	≤0.10	≤1.00	8.50 ~ 12.00	≤0.060	≤0.030	4.00 ~ 6.00	17.00 ~ 19.00	2.8 ~ 3.5	—	0.20 ~ 0.30	—
4	1Cr17Ni7	≤0.15	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	6.00 ~ 8.00	16.00 ~ 18.00	—	—	—	—
5	1Cr18Ni9	≤0.15	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	8.00 ~ 10.00	17.00 ~ 19.00	—	—	—	—
6	Y1Cr18Ni9	≤0.15	≤1.00	≤2.00	≤0.20	≥0.15	8.00 ~ 10.00	17.00 ~ 19.00	①	—	—	—
7	Y1Cr18Ni9Se	≤0.15	≤1.00	≤2.00	≤0.20	≤0.060	8.00 ~ 10.00	17.00 ~ 19.00	—	—	—	Se≥0.15
8	0Cr18Ni9	≤0.07	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	8.00 ~ 11.00	17.00 ~ 19.00	—	—	—	—
9	00Cr19Ni10	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	8.00 ~ 12.00	18.00 ~ 20.00	—	—	—	—
10	0Cr19Ni9N	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	7.00 ~ 10.50	18.00 ~ 20.00	—	—	0.10 ~ 0.25	—
11	0Cr19Ni10NbN	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	7.50 ~ 10.50	18.00 ~ 20.00	—	—	0.15 ~ 0.30	Nb≤0.15
12	00Cr18Ni10N	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	8.50 ~ 11.50	17.00 ~ 19.00	—	—	0.12 ~ 0.22	—
13	1Cr18Ni12	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	10.50 ~ 13.00	17.00 ~ 19.00	—	—	—	—

(续)

序号	牌号	化学成分(质量分数)(%)										
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	其他
奥氏体型												
14	0Cr23Ni13	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	12.00 ~ 15.00	22.00 ~ 24.00	—	—	—	—
15	0Cr25Ni20	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	19.00 ~ 22.00	24.00 ~ 26.00	—	—	—	—
16	0Cr17Ni12Mo2	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	10.00 ~ 14.00	16.00 ~ 18.50	2.00 ~ 3.00	—	—	—
17	1Cr18Ni12Mo2Ti®	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.00 ~ 14.00	16.00 ~ 19.00	1.80 ~ 2.50	—	—	Ti5 × (C% - 0.02) ~ 0.80
18	0Cr18Ni12Mo2Ti	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.00 ~ 14.00	16.00 ~ 19.00	1.80 ~ 2.50	—	—	Ti5 × C% - 0.70
19	00Cr17Ni14Mo2	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	12.00 ~ 15.00	16.00 ~ 18.00	2.00 ~ 3.00	—	—	—
20	0Cr17Ni12Mo2N	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	10.00 ~ 14.00	16.00 ~ 18.00	2.00 ~ 3.00	—	0.10 ~ 0.22	—
21	00Cr17Ni13Mo2N	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	10.50 ~ 14.50	16.00 ~ 18.50	2.00 ~ 3.00	—	0.12 ~ 0.22	—
22	0Cr18Ni12Mo2Cu2	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	10.00 ~ 14.50	17.00 ~ 19.00	1.20 ~ 2.75	1.00 ~ 2.50	—	—
23	00Cr18Ni14Mo2Cu2	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	12.00 ~ 16.00	17.00 ~ 19.00	1.20 ~ 2.75	1.00 ~ 2.50	—	—
24	0Cr19Ni13Mo3	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.00 ~ 15.00	18.00 ~ 20.00	3.00 ~ 4.00	—	—	—
25	00Cr19Ni13Mo3	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.00 ~ 15.00	18.00 ~ 20.00	3.00 ~ 4.00	—	—	—
26	1Cr18Ni12Mo3Ti®	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.00 ~ 14.00	16.00 ~ 19.00	2.50 ~ 3.50	—	—	Ti5 × (C% - 0.02) ~ 0.80
27	0Cr18Ni12Mo3Ti	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.00 ~ 14.00	16.00 ~ 19.00	2.50 ~ 3.50	—	—	Ti5 × C% - 0.70
28	0Cr18Ni16Mo5	≤0.040	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	15.00 ~ 17.00	16.00 ~ 19.00	4.00 ~ 6.00	—	—	—
29	1Cr18Ni9Ti®	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	8.00 ~ 11.00	17.00 ~ 19.00	—	—	—	Ti5(C% - 0.02) ~ 0.80
30	0Cr18Ni10Ti	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	9.00 ~ 12.00	17.00 ~ 19.00	—	—	—	Ti ≥ 5 × C%
31	0Cr18Ni11Nb	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	9.00 ~ 13.00	17.00 ~ 19.00	—	—	—	Nb ≥ 10 × C%
32	0Cr18Ni9Cu3	≤0.08	≤0.10	≤2.00	≤0.035	≤0.030	8.50 ~ 10.50	17.00 ~ 19.00	—	3.00 ~ 4.00	—	—
33	0Cr18Ni13Si4	≤0.08	3.00 ~ 5.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.50 ~ 15.00	15.00 ~ 20.00	—	—	—	②

(续)

序号	牌号	化学成分(质量分数)(%)										
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	其他
奥氏体·铁素体型												
34	0Cr26Ni5Mo2	≤0.08	≤1.00	≤1.50	≤0.035	≤0.030	3.00 ~ 6.00	23.00 ~ 28.00	1.00 ~ 3.00	—	—	②
35	1Cr18Ni11Si4AlTi	0.10 ~ 0.18	3.40 ~ 4.00	≤0.80	≤0.035	≤0.030	10.00 ~ 12.00	17.50 ~ 19.50	—	—	—	Al0.10 ~ 0.30; Ti0.40 ~ 0.70
36	00Cr18Ni5Mo3Si2	≤0.030	1.30 ~ 2.00	1.00 ~ 2.00	≤0.035	≤0.030	4.50 ~ 5.50	18.00 ~ 19.50	2.50 ~ 3.00	—	—	—
铁素体型												
37	0Cr13Al	≤0.08	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	③	11.50 ~ 14.50	—	—	—	Al0.10 ~ 0.30
38	00Cr12	≤0.030	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	③	11.0 ~ 13.00	—	—	—	—
39	1Cr17	≤0.12	≤0.75	≤1.00	≤0.035	≤0.030	③	16.00 ~ 18.00	—	—	—	—
40	Y1Cr17	≤0.12	≤1.00	≤1.25	≤0.060	≥0.15	③	16.00 ~ 18.00	①	—	—	—
41	1Cr17Mo	≤0.12	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	③	16.00 ~ 18.00	0.75 ~ 1.25	—	—	—
42	00Cr30Mo2 ^⑤	≤0.010	≤0.40	≤0.40	≤0.030	≤0.020	—	28.50 ~ 32.00	1.50 ~ 2.50	—	≤0.015	—
43	00Cr27Mo ^⑤	≤0.010	≤0.40	≤0.40	≤0.030	≤0.020	—	25.00 ~ 27.50	0.75 ~ 1.50	—	≤0.015	—
马氏体型												
44	1Cr12	≤0.15	≤0.50	≤1.00	≤0.035	≤0.030	③	11.50 ~ 13.00	—	—	—	—
45	1Cr13	≤0.15	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	③	11.50 ~ 13.50	—	—	—	—
46	0Cr13	≤0.08	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	③	11.50 ~ 13.50	—	—	—	—
47	Y1Cr13	≤0.15	≤1.00	≤1.25	≤0.060	≥0.15	③	12.00 ~ 14.00	①	—	—	—
48	1Cr13Mo	0.08 ~ 0.18	≤0.60	≤1.00	≤0.035	≤0.030	③	11.50 ~ 14.00	0.30 ~ 0.60	—	—	—
49	2Cr13	0.16 ~ 0.25	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	③	12.00 ~ 14.00	—	—	—	—
50	3Cr13	0.26 ~ 0.35	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	③	12.00 ~ 14.00	—	—	—	—
51	Y3Cr13	0.26 ~ 0.35	≤1.00	≤1.25	≤0.060	≥0.15	③	12.00 ~ 14.00	①	—	—	—
52	3Cr13Mo	0.28 ~ 0.35	≤0.80	≤1.00	≤0.035	≤0.030	③	12.00 ~ 14.00	0.50 ~ 1.00	—	—	—

(续)

序号	牌号	化学成分(质量分数)(%)										
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	其他
马氏体型												
53	4Cr13	0.36 ~ 0.45	≤0.60	≤0.80	≤0.035	≤0.030	③	12.00 ~ 14.00	—	—	—	—
54	1Cr17Ni2	0.11 ~ 0.17	≤0.80	≤0.80	≤0.035	≤0.030	1.50 ~ 2.50	16.00 ~ 18.00	—	—	—	—
55	7Cr17	0.60 ~ 0.75	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	③	16.00 ~ 18.00	④	—	—	—
56	8Cr17	0.75 ~ 0.95	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	③	16.00 ~ 18.00	④	—	—	—
57	9Cr18	0.90 ~ 1.00	≤0.80	≤0.80	≤0.035	≤0.030	③	17.00 ~ 19.00	④	—	—	—
58	11Cr17	0.95 ~ 1.20	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	③	16.00 ~ 18.00	④	—	—	—
59	Y11Cr17	0.95 ~ 1.20	≤1.00	≤1.25	≤0.060	≥0.15	③	16.00 ~ 18.00	④	—	—	—
60	9Cr18Mo	0.95 ~ 1.10	≤0.80	≤0.80	≤0.035	≤0.030	③	16.00 ~ 18.00	0.40 ~ 0.70	—	—	—
61	9Cr18MoV	0.85 ~ 0.95	≤0.80	≤0.80	≤0.035	≤0.030	③	17.00 ~ 19.00	1.00 ~ 1.30	—	—	V0.07 ~ 0.12
沉淀硬化型												
62	0Cr17Ni4Cu4Nb	≤0.07	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	3.00 ~ 5.00	15.50 ~ 17.50	—	3.00 ~ 5.00	—	Nb0.15 ~ 0.45
63	0Cr17Ni7Al	≤0.09	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	6.50 ~ 7.75	16.00 ~ 18.00	—	≤0.50	—	Al0.75 ~ 1.50
64	0Cr15Ni7Mo2Al	≤0.09	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	6.50 ~ 7.50	14.00 ~ 16.00	2.00 ~ 3.00	—	—	Al0.75 ~ 1.50

① 可加入小于等于0.60%钼。

② 必要时,可添加上表以外的合金元素。

③ 允许含有小于等于0.60%镍。

④ 可以加入小于等于0.75%钼。

⑤ 00Cr30Mo2、00Cr27Mo 允许含有小于等于0.50%镍,小于等于0.20%铜,而Ni+Cu≤0.50%,必要时,可添加上表以外的合金元素。

⑥ 此牌号除专用外,一般情况下不推荐使用。

表 4-18 耐热钢棒(GB/T1221—1992)

序号	牌号	化学成分(质量分数)(%)										
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	N	其他
奥氏体型钢												
1	5Cr21Mn9Ni4N	0.48 ~ 0.58	≤0.35	8.00 ~ 10.00	≤0.040	≤0.030	3.25 ~ 4.50	20.00 ~ 22.0			0.35 ~ 0.50	
2	2Cr21Ni12N	0.15 ~ 0.28	0.75 ~ 1.25	1.00 ~ 1.60	≤0.035	≤0.030	10.50 ~ 12.50	20.00 ~ 22.00			0.15 ~ 0.30	

(续)

序号	牌号	化学成分(质量分数)(%)										
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	N	其他
奥氏体型钢												
3	2Cr23Ni13	≤0.20	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	12.00 ~ 15.00	22.00 ~ 24.00				
4	2Cr25Ni20	≤0.25	≤1.50	≤2.00	≤0.035	≤0.030	19.00 ~ 22.00	24.00 ~ 26.00				
5	1Cr16Ni35	≤0.15	≤1.50	≤2.00	≤0.035	≤0.030	33.00 ~ 37.00	14.00 ~ 17.00				
6	0Cr15Ni25Ti2MoAlVB	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	24.00 ~ 27.00	13.50 ~ 16.00	1.00 ~ 1.50	0.10 ~ 0.50		Ti1.90 ~ 2.35; Al < 0.35 B0.001 ~ 0.010
7	0Cr18Ni9	≤0.07	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	8.00 ~ 11.00	17.00 ~ 19.00				
8	0Cr23Ni13	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	12.00 ~ 15.00	22.00 ~ 24.00				
9	0Cr25Ni20	≤0.08	≤1.50	≤2.00	≤0.035	≤0.030	19.00 ~ 22.00	24.00 ~ 26.00				
10	0Cr17Ni12Mo2	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	10.00 ~ 14.00	16.00 ~ 18.00	2.00 ~ 3.00			
11	4Cr14Ni14W2Mo	0.40 ~ 0.50	≤0.80	≤0.70	≤0.035	≤0.030	13.00 ~ 15.00	13.00 ~ 15.00	0.25 ~ 0.40			W2.00 ~ 2.75
12	3Cr18Ni12Si2N	0.22 ~ 0.30	1.40 ~ 2.20	10.50 ~ 12.50	≤0.060	≤0.030		17.00 ~ 19.00			0.22 ~ 0.33	
13	2Cr20Mn9Ni2Si2N	0.17 ~ 0.26	1.80 ~ 2.70	8.50 ~ 11.00	≤0.060	≤0.030	2.00 ~ 3.00	18.00 ~ 21.00			0.20 ~ 0.30	
14	0Cr19Ni13Mo3	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.00 ~ 15.00	18.00 ~ 20.00	3.00 ~ 4.00			
15	1Cr18Ni9Ti	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	8.00 ~ 11.00	17.00 ~ 19.00				Ti5 × (C% - 0.02) ~ 0.80
16	0Cr18Ni10Ti	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	9.00 ~ 12.00	17.00 ~ 19.00				Ti ≥ 5 × C
17	0Cr18Ni11Nb	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	9.00 ~ 13.00	17.00 ~ 19.00				Nb ≥ 10 × C
18	0Cr18Ni13Si4	≤0.08	3.00 ~ 5.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.50 ~ 15.00	15.00 ~ 20.00				①
19	1Cr20Ni14Si2	≤0.20	1.50 ~ 2.50	≤1.50	≤0.035	≤0.030	12.00 ~ 15.00	19.00 ~ 22.00				
20	1Cr25Ni20Si2	≤0.20	1.50 ~ 2.50	≤1.50	≤0.035	≤0.030	18.00 ~ 21.00	24.00 ~ 27.00				
铁素体型												
21	2Cr25N	≤0.20	≤1.00	≤1.50	≤0.040	≤0.030		23.00 ~ 27.00			≤0.25	②
22	0Cr13Al	≤0.08	≤1.00	≤1.00	≤0.040	0.030		11.50 ~ 14.50				Al0.10 ~ 0.30

(续)

序号	牌号	化学成分(质量分数)(%)										
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	N	其他
铁素体型												
23	00Cr12	≤0.030	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030		11.00 ~ 13.00				
24	1Cr17	≤0.12	≤0.75	≤1.00	≤0.040	≤0.030		16.00 ~ 18.00				Al0.10 ~ 0.30
马氏体型												
25	1Cr5Mo	≤0.15	≤0.50	≤0.60	≤0.035	≤0.030	≤0.60	4.00 ~ 6.00	0.45 ~ 0.60			
26	4Cr9Si2	0.35 ~ 0.50	2.00 ~ 3.00	≤0.70	≤0.035	≤0.030	≤0.60	8.00 ~ 10.00				
27	4Cr10Si2Mo	0.35 ~ 0.45	1.90 ~ 2.60	≤0.70	≤0.035	≤0.030	≤0.60	9.00 ~ 10.50	0.70 ~ 0.90			
28	8Cr20Si2Ni	0.75 ~ 0.85	1.75 ~ 2.25	0.20 ~ 0.60	≤0.030	≤0.030	1.15 ~ 1.65	19.00 ~ 20.50				
29	1Cr11MoV	0.11 ~ 0.18	≤0.50	≤0.60	≤0.035	≤0.030	≤0.60	10.00 ~ 11.50	0.50 ~ 0.70	0.25 ~ 0.40		
30	1Cr12Mo	0.10 ~ 0.15	≤0.50	0.30 ~ 0.50	≤0.035	≤0.030	0.30 ~ 0.60	11.50 ~ 13.00	0.30 ~ 0.60			②
31	2Cr12MoVNbN	0.15 ~ 0.20	≤0.50	0.50 ~ 1.00	≤0.035	≤0.030	③	10.00 ~ 13.00	0.30 ~ 0.90	0.10 ~ 0.40	0.05 ~ 0.10	Nb0.20 ~ 0.60
32	1Cr12WMoV	0.12 ~ 0.18	≤0.50	0.50 ~ 0.90	≤0.035	≤0.030	0.40 ~ 0.80	11.00 ~ 13.00	0.50 ~ 0.70	0.18 ~ 0.30		W0.70 ~ 1.10
33	2Cr12NiMoWV	0.20 ~ 0.25	≤0.50	0.50 ~ 1.00	≤0.035	≤0.030	0.50 ~ 1.00	11.00 ~ 13.00	0.75 ~ 1.25	0.20 ~ 0.40		W0.70 ~ 1.25
34	1Cr13	≤0.15	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	③	11.50 ~ 13.50				
35	1Cr13Mo	0.08 ~ 0.18	≤0.60	≤1.00	≤0.035	≤0.030	③	11.50 ~ 14.00				②
36	2Cr13	0.16 ~ 0.25	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	③	12.00 ~ 14.00				
37	1Cr17Ni2	0.11 ~ 0.17	≤0.80	≤0.80	≤0.035	≤0.030	1.50 ~ 2.50	16.00 ~ 18.00				
38	1Cr11Ni2W2MoV	0.10 ~ 0.16	≤0.06	≤0.60	≤0.035	≤0.030	1.40 ~ 1.80	10.50 ~ 12.00	0.35 ~ 0.50	0.18 ~ 0.30		W1.50 ~ 2.00
沉淀硬化型												
39	0Cr17Ni4Cu4Nb	≤0.07	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	3.00 ~ 5.00	15.50 ~ 17.50				Cu3.00 ~ 5.00; Nb0.15 ~ 0.45
40	0Cr17Ni7Al	≤0.09	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	6.50 ~ 7.75	16.00 ~ 18.00				Cu≤0.50; Al0.75 ~ 1.50

① 必要时,可添加上表以外的合金元素。

② 允许含有≤0.30% Cu。

③ 允许含有≤0.60% Ni。

表 4-19 炉用耐热钢

钢号	化 学 成 分 (质量分数)(%)													
	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	W	V	Mo	Ti	Ai	N ₂	其他
1Cr13Si3	≤0.12	≤0.7	2.3~2.8	≤0.03	≤0.035	≤0.6	12.5~14.5	—	—	—	—	—	—	—
1Cr13SiAl	0.1~0.2	≤0.7	1.0~1.5	≤0.03	≤0.035	≤0.6	12~14	—	—	—	—	1.0~1.8	—	—
1Cr18Si2	≤0.12	≤1.0	1.9~2.4	≤0.03	≤0.035	≤0.6	17~19	—	—	—	—	—	—	—
1Cr25Si2	≤0.10	≤1.0	1.6~2.1	≤0.03	≤0.035	≤0.6	24~26	—	—	—	—	—	—	—
1Cr23Ni13	≤0.20	≤2.0	≤1.0	≤0.03	≤0.035	12~15	22~25	—	—	—	—	—	—	—
1Cr20Ni14Si2	≤0.20	≤1.5	1.5~2.5	≤0.03	≤0.035	12~15	19~22	—	—	—	—	—	—	—
3Cr18Ni25Si2	0.3~0.4	≤1.5	1.5~2.5	≤0.03	≤0.035	23~26	17~20	—	—	—	—	—	—	—
1Cr23Ni18	≤0.20	≤2.0	≤1.0	≤0.03	≤0.035	17~20	22~25	—	—	—	—	—	0.22~0.3	—
1Cr25Ni20Si2	≤0.20	≤1.5	1.5~2.5	≤0.03	≤0.035	18~21	24~27	—	—	—	—	—	0.20~0.30	—

4.2 国产钢材物理化学性质(表 4-20)

表 4-20 国产钢铁材料物理化学性质

牌号	密度 ρ /t· m ⁻³	熔点 /℃	比热容 c_p /J·(kg·℃) ⁻¹ (室温~100℃)	弹性 模量 E /MPa (室温)	切变 模量 G /MPa (室温)	泊松比 ν (室温)	热导率 λ /W·(m·℃) ⁻¹ (温度)	线胀系数 α /×10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹ (室温~100℃)	电阻率 ρ /×10 ⁻⁸ Ω·m (温度)
Q235	7.86	1468	745.25(200℃)	212000	82300	0.288	61.13(200℃)	12.04	29.3(200℃)
08	7.82	1440	486.00	210840	82473	0.280	48.00(100℃)	12.16	0.0
08Al	7.89	1490	560.19(200℃)	214000	81400	0.310	55.68(200℃)	11.88	24.8(200℃)
10	7.86	1450	477.00	210349	82669	0.270	44.00(100℃)	12.63	0.0
15	7.85	1400	486.00	212801	82571	0.290	40.00(100℃)	11.87	0.0
20	7.80	1430	485.00	212703	84029	0.280	45.00(100℃)	11.92	0.0
20g	7.87	1472	502.42(200℃)	209000	81400	0.283	47.73(200℃)	12.26	0.0
35	7.87	1395	482.00	212213	82080	0.290	46.00(100℃)	12.45	0.0
45	7.86	1433	577.78(200℃)	209000	82300	0.269	46.89(200℃)	11.70	32.0(200℃)
50	7.86		498.00	207407	81100	0.290	47.00	12.06	0.0
YF45MV	—	—	—	—	—	—	44.70(469℃)	10.20	33.3(469℃)
16MnR	7.85	1430	481.48(200℃)	209000	82000	0.280	37.14(200℃)	12.55	360.0(200℃)
16MnL	7.87	1490	506.60(200℃)	212000	80700	0.310	40.95(200℃)	12.79	30.4(100℃)
16Mng	7.85	1435	276.33(100℃)	208000	82000	0.268	23.36(100℃)	13.66	57.5(100℃)
45Mn	7.82	1415	477.00	210840	81884	0.290	50.00(100℃)	12.00	0.0
09SiV1	7.84	1470	—	213095	80904	0.320	0.00	12.46	0.0
55Tid	7.84	1400	498.00	210349	81737	0.290	0.00	12.21	0.0
35Mn2	7.86	1420	469.00	206035	79237	0.300	35.00(100℃)	12.23	0.0
20MnCr5	7.87	1410	477.00	209000	82100	0.280	42.00(97℃)	13.05	0.0
16MnCr5	7.89	1445	481.00	211000	82600	0.280	41.00(101℃)	12.59	0.0
40MnB	7.87	1420	573.59(200℃)	209000	81400	0.284	47.73(200℃)	13.90	35.1(200℃)
								(室温~400℃)	
40MnVB	7.86	1430	475.00	211232	82080	0.290	0.00	12.65	0.0
20Cr	7.83		477.00	210100	82400	0.300	50.66(20℃)	13.56	
40Cr	7.87	1400	552.66(200℃)	215000	84400	0.277	43.96(194.6℃)	12.00	34.1(194.6℃)

(续)

牌号	密度 ρ /t· m ⁻³	熔点 /℃	比热容 c_p /J·(kg·℃) ⁻¹ (室温~100℃)	弹性 模量 E /MPa (室温)	切变 模量 G /MPa (室温)	泊松比 ν (室温)	热导率 λ /W·(m·℃) ⁻¹ (温度)	线胀系数 α /×10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹ (室温~100℃)	电阻率 ρ /×10 ⁻⁸ Ω·m (温度)
15CrMo	7.88	1440	590.34(200℃)	212000	82500	0.284	46.05(198℃)	13.37 (20~100℃)	0.0
20CrMoH	7.84	1400	503.00	210055	82129	0.280	39.00(100℃)	12.66	0.0
15Cr2Mo	7.88	1445	502.00 (室温~200℃)	212801	83257	0.280	36.10(200℃)	13.15 (室温~200℃)	0.0
35CrMo	7.87	1403	561.03(100℃)	217000	84000	0.286	47.73(105℃)	12.50	26.0(105℃)
42CrMo	7.85	1390	482.00	211722	82473	0.280	0.00	12.43	0.0
35VB	7.86	—	468.00	213000	84700	0.260	44.00(100℃)	12.55(100℃)	—
20CrMnSi	7.80	—	498.00	209859	82228	0.280	31.00	12.19	0.0
20CrMnTi	7.86	1440	569.40(200℃)	212000	81700	0.298	41.07(200℃)	12.70	38.0(200℃)
20MnVB	7.87	—	477.00	207400	82570	0.47	—	11.20(20℃)	—
25MnVB	—	—	—	—	—	—	—	—	—
25MnTiBRE	7.85	—	490	205000	82000	0.25	—	10.50(200℃)	—
20Cr2MoV	7.86	1400	519.00	211330	81002	0.300	32.00(100℃)	11.85	0.0
50CrV	7.84	—	503.00	216724	83649	0.290	42.00(100℃)	12.20	0.0
60Si2Mn	7.74	1357	460.55(100℃)	210000	81400	0.290	29.31(200℃)	12.60	55.1(200℃)
55SiMnVB	7.86	1340	515.00	209467	81688	0.280	32.00(100℃)	11.76	0.0
12CrNi3A	7.84	—	477.00	211820	81002	0.300	37.00(100℃)	11.95	0.0
12Cr2Ni4	7.84	—	486.00	207407	79629	0.300	32.00	12.89	0.0
12Cr3MoVTiB	7.78	1400	469.00	217704	86101	0.270	29.00(100℃)	12.16	0.0
40CrNiMo	7.87	1408	581.97(200℃)	213000	82300	0.295	36.01(150℃)	12.80	36.2(150℃)
28CrNiMoV	7.87	1420	598.71(200℃)	213000	82900	0.000	44.80(200℃)	11.09	36.3(200℃)
45CrNiMoV	7.83	—	488.00	213782	82865	0.290	39.00(100℃)	12.11	0.0
18CrNiW	7.91	1432	531.72(100℃)	206000	80900	0.273	28.47(117℃)	12.40	41.9(117℃)
25Cr12WMoV (C-422AISI)	7.84	1423	530.00	216000	84400	0.279	27.70(200℃)	10.38 (100℃)	67.9(200℃)
12Cr2MoWVTiE	7.83	1435	401.51(200℃)	210000	82000	0.279	33.95(200℃)	12.69	48.2(200℃)
GCr15	7.83	—	475.00	214762	83061	0.300	44.00(100℃)	12.03	0.0
7Cr7Mo2V2Si	7.72	—	485.00(100℃)	225000	82200	0.36	20.50(98℃)	11.10	—
9Cr18	7.66	—	448.00	231433	90416	0.280	29.00(100℃)	9.92	0.0
BHW35(DIN)	7.84	1470	548.47(200℃)	209000	80900	0.291	39.77(200℃)	12.62	40.6(200℃)
HCM9m (9Cr-2Mo)	7.81	1440	0.00	236141	90710	0.300	27.60(300℃)	11.47 (室温~300℃)	0.0
10CrMo910	7.87	1440	469.00	215939	84140	0.280	34.00(100℃)	12.17	0.0
5Cr21Mn9Ni4N (21-4N)	7.73	—	61500(200℃)	—	—	—	17.60(200℃)	17.90(300℃)	89.7(200℃)
2Cr13	7.75	1430	53600(150℃)	223000	85800	0.297	26.80(150℃)	10.8(100℃)	67.9(150℃)
ZG35	7.84	1440	489.00	206000	77000	0.340	—	—	—
ZG20SiMn	7.86	1430	475.00	211232	82080	0.290	0.00	12.65	0.0
QT60-2	7.12	1150	954.59(200℃)	169000	65600	0.286	46.05(200℃)	11.79	38.5(200℃)
HT20-40	7.33	1130	494.00	148078	56584	0.310	40.00(100℃)	10.98	0.0
HT30-54	7.30	1130	523.00	143175	56584	0.270	47.00(100℃)	11.22	0.0

4.3 常用钢临界温度、锻造温度、热处理工艺参数(表 4-21 ~ 表 4-27)

表 4-21 调质钢

钢 号	Ac_1 /°C	Ac_3 /°C	Ar_1 /°C	Ar_3 /°C	M_s /°C	始锻温度 /°C	终锻温度 /°C	退火温度 /°C	退火硬度 HBW 不大于	正火温度 /°C
30	732	813	677	796	380	1125	800	—	—	850 ~ 900
35	724	802	680	774		1200	800	850 ~ 880	187	840 ~ 890
40	724	790	680	760		1200	850	—	187	840 ~ 860
45	724	780	682	751		1180 ~ 1210	800	800 ~ 840	197	830 ~ 880
50	725	760	690	721		1100	800	820 ~ 840	207	830
55	727	774	690	755		1075	800	800	217	820
30Mn	734	812	675	796		1125	850	—	187	850
40Mn	726	790	689	768		1100	800	—	207	840 ~ 870
50Mn	720	760	660		320	1100	800	820 ~ 840	217	830
35Mn2	713	793	630	710		1150	800 ~ 850	—	207	840 ~ 860
40Mn2	713	766	627	704	340	1150	800 ~ 850	—	217	840 ~ 860
45Mn2	715	770	640	720	320	1150	850 ~ 800	810 ~ 840	217	820 ~ 860
50Mn2	710	760	596	680		1050	850	790 ~ 820	229	830 ~ 850
35SiMn	750	830	645		330	1100	850	—	229	860 ~ 890
42SiMn	765	800 ~ 820				1200	800	—	229	850 ~ 880
40B	730	790	690	727		1200	800	—	207	850 ~ 870
45B	725	770	690	720		1200	800	—	217	830 ~ 850
40MnB	735	780	650	700		1150	850	820 ~ 860	207	850 ~ 900
45MnB	727	780				1150	850	820 ~ 860	217	840 ~ 870
40MnVB	730	774	639	681		1200	800	—	207	860 ~ 900
30Cr	740	815	670			1200	800	—	187	860
35Cr	740	815	670			1200	800	—	207	850 ~ 870
40Cr	743	782	693	730	355	1200	800	825 ~ 845	207	850 ~ 870
45Cr	721	771	660	693		1200	800	—	217	840 ~ 860
50Cr	721	771	660	693		1200	800	800 ~ 820	229	830 ~ 850
30CrMo	757	807	693	763	345	1150	850	—	229	860 ~ 890
35CrMo	755	800	695	750	271	1150	850	—	229	830 ~ 860
42CrMo	730	780	690		360	1100	850	850	217	850 ~ 860
40CrV	755	790	700	745	218	1150 ~ 1200	800	—	241	850 ~ 880
40CrMnMo	735	780	680			1100	850	840 ~ 850	241	—
30CrMnTi	765	790	660	740		1200	800	—	—	880 ~ 920
40CrNi	731	769	660	702		1150	800	840 ~ 880	230	870 ~ 900
45CrNi	725	775	680			1150	850	800 ~ 830	255	—
50CrNi	725	770	680		300	1150	850	—	256	900 ~ 920
30CrNi3	710	780	650			1150	850	—	241	860 ~ 880
37CrNi3	710	770	640			1050 ~ 1075	850	—	269	850
40CrNiMoA	732	774	680			1150	850	840 ~ 860	269	890 ~ 920
45CrNiMoVA	710	790			275	1230	980	850 ~ 860	269	—

钢 号	正火硬度 HBW	淬火温度 /°C	淬火介质	淬火硬度 HRC	回火温度 /°C	回火硬度 HRC
30	—	850 ~ 900	水	48 ~ 53	550 ~ 650	152 ~ 212HBW
35	191	850 ~ 890	水	48 ~ 55	480 ~ 500	28 ~ 32
40	—	830 ~ 850	水	53 ~ 58	480 ~ 520	28 ~ 32
45	226	820 ~ 840	水	55 ~ 60	500 ~ 540	28 ~ 32
50	—	810 ~ 830	水	58 ~ 63	500 ~ 560	30 ~ 35
55	—	800 ~ 820	水	60 ~ 65	550 ~ 580	28 ~ 32
30Mn	—	825 ~ 850	水	49 ~ 53	400 ~ 650	
40Mn	—	840 ~ 860	油	52 ~ 58	600	235HBW
50Mn		820 ~ 840	水或油	60 ~ 64	550 ~ 600	28 ~ 33
35Mn2	≤241	830 ~ 850	水或油	52 ~ 57	500 ~ 550	25 ~ 32

(续)

钢 号	正火硬度 HBW	淬火温度 /℃	淬火介质	淬火硬度 HRC	回火温度 /℃	回火硬度 HRC
40Mn2	≤241	830~850	水或油	54~59	550~600	300~230HBS
45Mn2	187~241	810~840	水或油	57~63	500~550	30~35
50Mn2	—	790~820	油	60~64	500~600	28~35
35SiMn	—	860~890	水或油	52~57	500~540	28~32
42SiMn	—	850~880	水或油	55~59	590 水冷	
40B	—	840~860	油或水	54~58	550 水	
45B	—	830~850	水或油	54~60	500~600	30~36
40MnB	197~207	820~860	油或热水	54~59	500~600	260~325
45MnB	—	830~860	油或热水	57~61	500~550	28~33
40MnVB	≤229	840~870	水或油	54~59	500~560	28~32
30Cr	—	850~870	油	48~55	500~550	28~33
35Cr	—	850~870	油	51~56	520~550	28~33
40Cr	≤250	840~870	油	54~59	560~580	28~32
45Cr	≤228	830~850	油	56~61	560~580	28~33
50Cr	—	820~840	油	59~65	600~650	30~35
30CrMo	—	860~890	油	50~55	540~570	32~28
35CrMo	≤241	850	油	52~56	520~560	35~30
42CrMo	—	850~860	油	55~59	220~650	58~28
40Cr	—	850~880	水或油	54~58	450~500	35~42
40CrMnMo	—	840~850	油	54~59	630~650	30~35
30CrMnTi	—	840~860	油		180~200	
40CrNi	≤250	840~860	油	54~59	500~550	30~35
45CrNi	—	810~830	油	56~61	560~600	25~30
50CrNi	180~207	800~820	油	59~65	440~460	35~38
30CrNi3	170~228	810~840	油	50~54	550~650	23~28
37CrNi3	—	850~860	油	51~57	650~670	30~35
40CrNiMoA	—	840~860	油	55~59	640~670	28~32
45CrNiMoVA	—	850~900	油		200~650	56~35

表 4-22 渗碳钢和渗氮钢

钢 号	Ac ₁ /℃	Ac ₃ /℃	Ar ₁ /℃	Ar ₃ /℃	M _s /℃	始锻 温度 /℃	终锻 温度 /℃	退火 硬度 HBW 不大于	正火 温度 /℃	淬火 温度 /℃	渗碳或 渗氮温度 /℃	渗碳 淬火 温度 /℃	淬火 介质	回火 温度 /℃	回火 硬度 HRC
10	724	876	682	850		1200	800	—	915~ 945	—	920~940 渗碳	890~ 780	水	—	—
15	735	863	685	840		1200	800	—	905~ 935	—	920~940 渗碳	760~ 800	水	160~ 200	—
20	735	854	682	835		1200	800	—	895~ 925	—	920~940 渗碳	770~ 800	水	—	—
25	735	840	680	824		1200	800	—	885~ 915	—	920~940 渗碳	860~ 880	水	400~ 650	—
20Mn	735	854	682	835		1150~ 1200	850~ 900	—	895~ 925	—	910~930 渗碳	770~ 800	水	160~ 200	58~ 64
20Mn2	725	840	610	740	400	1150~ 1200	850~ 900	187	870~ 890	830~ 870	910~930 渗碳	770~ 800	水,油	160~ 200	58~ 64
20Mn2B	730	853	613	736		1150	850	187	880~ 900	860~ 900	910~930 渗碳	780~ 800	油	—	—

(续)

钢 号	Ac ₁ /℃	Ac ₃ /℃	Ar ₁ /℃	Ar ₃ /℃	M _s /℃	始锻 温度 /℃	终锻 温度 /℃	退火 硬度 HBW 不大于	正火 温度 /℃	淬火 温度 /℃	渗碳或 渗氮温度 /℃	渗碳 淬火 温度 /℃	淬火 介质	回火 温度 /℃	回火 硬度 HRC
20MnVB	720	840	635	770		1150	850	207	950 ~ 970	840 ~ 880	900 ~ 950 渗碳	830 ~ 840	油	180 ~ 200	—
25MnTiBRE	708	870	605	705		1100 ~ 1200	900 ~ 100	229	950	840 ~ 880	910 ~ 930 渗碳	840 ~ 870	油, 水	180 ~ 200	—
15Cr	735	870	720			1200	800	179	880 ~ 900	860 ~ 900	900 ~ 930 渗碳	780 ~ 800	水	180 ~ 200	58 ~ 63
20Cr	766	838	702	799		1200	800	179	870 ~ 900	860 ~ 900	920 ~ 940 渗碳	770 ~ 820	油, 水	160 ~ 200	58 ~ 64
20CrMo	743	818	504	746		1150	850	229	880 ~ 920	870 ~ 890	920 ~ 940 渗碳	810 ~ 830	油, 水	160 ~ 200	58 ~ 64
35CrMoV	755	835	600		356	1200	850	241	840 ~ 860	830 ~ 870	480 ~ 520 渗碳	880 ~ 910	油	200 ~ 220	48 ~ 53
25Cr2MoVA	760	840	~	~		1200	850	241	930 ~ 950	880 ~ 920	500 ~ 520 渗碳	930 ~ 950	油	620 ~ 650	28 ~ 33
38CrMoAl	800	940	730		330	1180	850	229	930 ~ 970	920 ~ 960	500 ~ 600 渗碳		油或 水	600 ~ 680	241 ~ 321 HBS
20CrV	768	840	704	782		1250	800	197	880 ~ 920	860 ~ 900	920 ~ 940 渗碳	770 ~ 820	水, 油	180 ~ 200	—
5CrMn	750	845			400	1150	850	179	880 ~ 900	860 ~ 900	920 ~ 940 渗碳	780 ~ 820	水, 油	160 ~ 200	—
20CrMn	765	838	700	798		1050	850	187	880 ~ 920	830 ~ 870	910 ~ 930 渗碳	810 ~ 830	水, 油	180 ~ 200	—
20CrMnMo	710	830	620	740		1200	850	217	850 ~ 870	830 ~ 870	900 ~ 930 渗碳	810 ~ 830	油	180 ~ 200	58 ~ 63
20CrMnTi	740	825	680	730		1200	900	217	920 ~ 950	860 ~ 900	920 ~ 940 渗碳	820 ~ 850	油	180 ~ 200	—
20CrNi	733	804	666	790		1150 ~ 1200	850	229	900 ~ 920	830 ~ 870	900 ~ 930 渗碳	800 ~ 820	油	180 ~ 200	58 ~ 63
12CrNi2	732	794	671	763		1150 ~ 1200	850	207	880 ~ 920	840 ~ 880	900 ~ 920 渗碳	770 ~ 800	油	180 ~ 200	≥ 58
12CrNi3	710	820	660			1150	850	207	880 ~ 920	840 ~ 880	900 ~ 930 渗碳	780 ~ 820	油	180 ~ 200	≥ 60
20CrNi3	700	760	500	630		1150	850	241	850 ~ 880	810 ~ 850	900 ~ 930 渗碳	780 ~ 820	油	180 ~ 200	≥ 60
12Cr2Ni4	720	780	575	660		1150 ~ 1200	800 ~ 850	269	905	840 ~ 880	910 ~ 930 渗碳	770 ~ 800	油	160 ~ 200	≥ 60
20Cr2Ni4	720	780	575	660	305	1000 ~ 1050	800 ~ 850	269	920	860 ~ 900	900 ~ 930 渗碳	780 ~ 820	油	160 ~ 200	≥ 60
18Cr2Ni4WA	700	810	350	400		1200	850	269	—	930 ~ 970	920 ~ 940 渗碳	780 ~ 800	油	180 ~ 200	56 ~ 62

表 4-23 弹簧钢

钢号	Ac_1 /℃	Ac_3 /℃	Ar_1 /℃	Ar_3 /℃	M_s /℃	始锻 温度 /℃	终锻 温度 /℃	退火 温度 /℃	正火 温度 /℃	正火 硬度 HBW 不大于	淬火 温度 /℃	淬火 介质	回火 温度 /℃	回火 硬度 HRC
60	727	766	690	743	—	1100	850	800 ~ 820	—	—	800 ~ 820	水	340 ~ 450	40 ~ 45
65	727	752	696	730	—	1100	850	790 ~ 810	—	—	790 ~ 810	水	400 ~ 500	37 ~ 45
85	723	737	695	—	220	1050	850	780 ~ 800	—	—	780 ~ 820	水, 油	375 ~ 400	40 ~ 49
65Mn	726	765	689	741	270	1050 ~ 1100	800 ~ 850	780 ~ 840	820 ~ 860	269	780 ~ 840	油, 水	380 ~ 400	45 ~ 50
60Si2Mn	755	810	700	770	305	1050 ~ 1100	850 ~ 900	—	830 ~ 860	254	860 ~ 880	油, 水	410 ~ 460	45 ~ 50
50CrVA	752	788	688	746	270	1100 ~ 1160	850 ~ 900	810 ~ 870	850 ~ 880	288	850 ~ 890	—	400 ~ 500	42 ~ 47

表 4-24 轴承钢

钢 号	Ac_1 /℃	Ac_3 /℃	Ar_1 /℃	Ar_3 /℃	M_s /℃	始锻温度 /℃	终锻温度 /℃	退火温度 /℃
GCr6	735	860	700	—	—	1050 ~ 1100	800 ~ 850	780 ~ 800
GCr9	740	887	700	—	—	1050 ~ 1100	800 ~ 850	780 ~ 810
GCr9SiMn	738	775	700	724	—	1050 ~ 1100	800 ~ 850	760 ~ 790
GCr15	745	900	700	—	240	1050 ~ 1100	800 ~ 850	780 ~ 810
GCr15SiMn	770	872	708	—	210	1050 ~ 1100	800 ~ 850	780 ~ 810

钢 号	退火硬度 HBW	淬火温度 /℃	淬火介质	淬火硬度 HRC	回火温度 /℃	回火硬度 HRC
GCr6	170 ~ 207	800 ~ 825	油, 水	62 ~ 66	150 ~ 170	61 ~ 65
GCr9	187 ~ 228	800 ~ 850	油	62 ~ 66	150 ~ 170	61 ~ 65
GCr9SiMn	≤ 217	800 ~ 840	油	63 ~ 65	150 ~ 170	61 ~ 65
GCr15	197 ~ 228	830 ~ 860	油, 水	62 ~ 66	150 ~ 170	61 ~ 65
GCr15SiMn	170 ~ 207	820 ~ 860	油	≥ 62	150 ~ 170	61 ~ 65

表 4-25 工具钢

钢 号	Ac_1 /℃	Ac_3 /℃	Ar_1 /℃	M_s /℃	始锻温度 /℃	终锻温度 /℃	退火温度 /℃
T7	725	765	700	280	1100 ~ 1125	860	730 ~ 750
T8	730	750	700	220 ~ 230	1070 ~ 1100	850	740 ~ 760
T8Mn	750 ~ 780	—	710 ~ 675	180	1050 ~ 1100	850	740 ~ 760
T9	740	760	700	190	1025	800	750 ~ 780
T10	730	800	700	210	1075 ~ 1100	850	760 ~ 780
T11	730	810	700	—	980 ~ 1070	820	760 ~ 790
T12	730	820	700	200	1075 ~ 1100	850	760 ~ 780
T13	730	830	700	190	1000	800	680 ~ 710
9SiCr	770	870	730	160	1100 ~ 1140	800 ~ 870	780 ~ 800
Cr06	730	950	700	—	980 ~ 1070	810	780 ~ 800
Cr2	745	900	700	240	980 ~ 1090	840	770 ~ 800
9Cr2	730	860	700	270	1120 ~ 1150	800 ~ 860	770 ~ 790
W	740	820	710	—	980 ~ 1090	840	760 ~ 800
4CrW2Si	780	840	—	315	1160 ~ 1180	860 ~ 920	800 ~ 820
5CrW2Si	770	860	725	295	1160 ~ 1180	820 ~ 920	800 ~ 820
6CrW2Si	770	810	725	280	1160 ~ 1170	820 ~ 900	780 ~ 800
Cr12	810	835	755	180	1010 ~ 1100	927	870 ~ 900
Cr12MoV	830	855	750	230	1010 ~ 1200	927	870 ~ 900
9Mn2V	736	765	652	180	980 ~ 1050	800 ~ 850	740 ~ 775

(续)

钢 号	A_{c1} /℃	A_{c3} /℃	A_{r1} /℃	M_s /℃	始锻温度 /℃	终锻温度 /℃	退火温度 /℃
CrWMn	750	940	710	200 ~ 210	1100	850	770 ~ 790
9CrWMn	750	900	710	230	980 ~ 1090	840	770 ~ 790
Cr4W2MoV	795	900	760	142	1050 ~ 1100	≥880	805 ~ 870
5CrMnMo	700	800	680	215	1180	800 ~ 850	710 ~ 750
4Cr5MoV1Si	875	935	760	305	1065 ~ 1175	850 ~ 900	845 ~ 900
5CrNiMo	730	780	610	230	1180	850	700 ~ 720
3Cr2W8V	800	850	690	380	1065 ~ 1185	850 ~ 900	860 ~ 900
8Cr3	785	830	750	370	1160	850	800 ~ 820
4Cr5W2VSi	800	875	730	275	1180	850	840 ~ 880
钢 号	退火硬度 HBW	预热温度 /℃	淬火温度 /℃	淬火介质	淬火硬度 HRC	回火温度 /℃	回火硬度 HRC
T7	≤187	650	780 ~ 830	盐水, 水	63 ~ 65	160 ~ 200	60 ~ 63
T8	≤187	600 ~ 650	730 ~ 750	水, 盐水	63 ~ 65	150 ~ 220	63 ~ 57
T8Mn	≤207	—	760 ~ 820	水	63 ~ 65	150 ~ 200	> 59
T9	< 201	600 ~ 650	760 ~ 800	水, 盐水	64 ~ 66	150 ~ 300	65 ~ 55
T10	≤197	565 ~ 600	760 ~ 780	盐水-油	64 ~ 66	150 ~ 250	63 ~ 58
T11	< 202	—	760 ~ 780	水, 盐水	64 ~ 66	160 ~ 300	65 ~ 55
T12	≤207	—	760 ~ 780	水, 油	64 ~ 66	160 ~ 250	63 ~ 58
T13	210	—	760 ~ 790	水	64 ~ 66	200 ~ 300	62 ~ 54
9SiCr	197 ~ 241	600 ~ 650	860 ~ 870	油	62 ~ 64	150 ~ 250	58 ~ 62
Cr06	241 ~ 187	—	780 ~ 800	水	65 ~ 62	200 ~ 300	62 ~ 55
Cr2	179 ~ 207	—	790 ~ 840	油, 水	64 ~ 66	150 ~ 320	64 ~ 56
9Cr2	179 ~ 229	—	820 ~ 850	油	62	160 ~ 250	62 ~ 58
W	183 ~ 207	—	790 ~ 830	水, 盐水	63 ~ 66	150 ~ 250	60 ~ 64
4CrW2Si	179 ~ 229	700 ~ 750	870 ~ 900	油	52 ~ 57	250 ~ 400	48 ~ 52
5CrW2Si	207 ~ 255	700 ~ 750	870 ~ 900	油	56 ~ 61	200 ~ 250	53 ~ 58
6CrW2Si	229 ~ 285	650 ~ 700	850 ~ 880	油	58 ~ 63	430 ~ 470	45 ~ 50
Cr12	207 ~ 255	800 ~ 850	980 ~ 1000	油	63 ~ 65	200 ~ 540	61 ~ 54
Cr12MoV	217 ~ 250	800 ~ 850	980 ~ 1050	油, 空	63 ~ 65	200	≥60
9Mn2V	≤212	650(大件)	790 ~ 815	油	≥62	150 ~ 260	62 ~ 57
CrWMn	179 ~ 227	650 ~ 700	830 ~ 850	油	63 ~ 65	150 ~ 250	62 ~ 64
9CrWMn	187 ~ 228	650	820 ~ 840	油	64 ~ 66	150 ~ 200	≥60
Cr4W2MoV	240 ~ 255	800 ~ 850	980 ~ 1040	油, 熔盐	> 60	500 ~ 540	> 60
5CrMnMo	≤230	—	830 ~ 870	油	58 ~ 62	490 ~ 640	30 ~ 47
4Cr5MoV1Si	192 ~ 229	800 ~ 850	995 ~ 1040	空, 油	55 ~ 58	540 ~ 650	53 ~ 38
5CrNiMo	≤241	—	840 ~ 860	油	58 ~ 62	500 ~ 550	38 ~ 41
3Cr2W8V	205 ~ 235	800 ~ 850	1130 ~ 1150	油, 空	49 ~ 56	550 ~ 650	48 ~ 52
8Cr3	207 ~ 255	—	820 ~ 860	油	61 ~ 64	150 ~ 200	> 60
4Cr5W2VSi	≤241	800 ~ 850	1030 ~ 1050	空, 油	52 ~ 57	560 ~ 580	47 ~ 49

表 4-26 高速工具钢

钢 号	A_{c1} /°C	A_{c3} /°C	A_{r1} /°C	M_s /°C	始锻温度 /°C	终锻温度 /°C	退火温度 /°C	退火硬度 HBW
W18Cr4V	820	860	760	210	1150 ~ 1180	950 ~ 900	860 ~ 880	217 ~ 255
W18Cr4VCo5	842 ~ 872	—	—	—	1065 ~ 1180	900	840 ~ 900	< 262
W12Cr4V5Co5	843 ~ 873	—	740	—	1180	980	870 ~ 900	≤ 285
W6Mo5Cr4V2	835	885	770	225	1040 ~ 1150	900 ~ 950	820 ~ 870	212 ~ 241
W6Mo5Cr4V2Al	835	885	770	—	1040 ~ 1150	900 ~ 950	850 ~ 870	207 ~ 255
W6Mo5Cr4V2Co5	825 ~ 851	—	—	220	1040 ~ 1150	900	850 ~ 880	≤ 277
W12Mo3Cr4V3Co5Si	835 ~ 860	—	—	140	1040 ~ 1150	950	870 ~ 900	—

钢 号	第一次预热温度 /°C	第二次预热温度 /°C	淬火温度 /°C	淬火 介质	淬火硬度 HRC	回火温度 /°C	回火硬度 HRC
W18Cr4V	500 ~ 600	820 ~ 870	1260 ~ 1300	空, 油	64 ~ 66	540 ~ 590	60 ~ 65
W18Cr4VCo5	550	850	1270 ~ 1310	空, 油	> 63	560 ~ 590	> 63
W12Cr4V5Co5	815 ~ 870	—	1220 ~ 1260	空, 油	62 ~ 64	540 ~ 580	> 64
W6Mo5Cr4V2	550	850	1225 ~ 1235	油, 空	63 ~ 66	540 ~ 580	63
W6Mo5Cr4V2Al	550 ~ 800	—	1210 ~ 1250	空, 油	> 65	540 ~ 600	67 ~ 69
W6Mo5Cr4V2Co5	500 ~ 550	800 ~ 850	1220 ~ 1260	空, 油	63 ~ 65	530 ~ 570	66 ~ 67
W12Mo3Cr4V3Co5Si	820 ~ 850	—	1220 ~ 1240	空, 油	62 ~ 64	540 ~ 560	68 ~ 70

表 4-27 不锈钢耐热钢

钢 号	A_{c1} /°C	A_{c3} /°C	A_{r1} /°C	A_{r3} /°C	M_s /°C	始锻 温度 /°C	终锻 温度 /°C	退火 温度 /°C	退火 硬度 HBW	淬火或 固溶处 理温度 /°C	淬火 介质	淬火硬度 HRC	回火或 时效 温度 /°C	回火或时 效硬度 HRC
1Cr18Ni9	—	—	—	—	—	1150	900	—	—	1010 ~ 1150	水 (快冷)	130 ~ 180 HBS	—	—
1Cr18Ni9Ti	—	—	—	—	—	1150	900	—	—	1100 ~ 1160	水 (快冷)	140 ~ 170 HBS	800	—
1Cr13	730	850	700	820	350	1100	900	860 ~ 900	179	950 ~ 1050	油	380 ~ 400 HBS	700 ~ 750	223 ~ 300HB
2Cr13	820	950	780	—	300 ~ 350	1100 ~ 1150	850 ~ 900	860 ~ 900	160 ~ 187	980 ~ 1000	油, 空	47 ~ 49	600 ~ 750	25 ~ 40
3Cr13	820	—	780	—	240	1100	> 850	860 ~ 900	≤ 207	1020 ~ 1050	油或空	52 ~ 55	600 ~ 750	39 ~ 46
1Cr17Ni2	810	—	780	—	357	1000 ~ 1050	> 850	860	≤ 250	980 ~ 1065	油, 空	44 ~ 51	560 ~ 605	26 ~ 34
4Cr14Ni14W2Mo	—	—	—	—	—	1050 ~ 1150	900 ~ 950	820 ~ 850	179 ~ 269	1170 ~ 1200	水 (快冷)	150 ~ 210 HBS	—	—
4Cr9Si2	900 ~ 920	970 ~ 1020	816 ~ 860	870	—	1100	900	850 ~ 900	193 ~ 230	1000 ~ 1050	油	58 ~ 63	700 ~ 750	28 ~ 35
4Cr10Si2Mo	910 ~ 925	—	840 ~ 860	—	—	1000 ~ 1100	900 ~ 950	850 ~ 900	217 ~ 248	1020 ~ 1050	油或空	58 ~ 63	720 ~ 780	30 ~ 37

4.4 常用钢力学性能技术要求(表 4-28 ~ 表 4-34)

表 4-28 普通碳素结构钢力学性能(GB/T 700—1988)

牌号	等 级	拉伸试验													冲击试验	
		屈服点 σ_s /MPa						抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ_5 (%)						温度 /℃	V 形冲 击吸收功 (纵向) /J
		钢材厚度(直径)/mm							钢材厚度(直径)/mm							
		≤ 16	$> 16 \sim 40$	$> 40 \sim 60$	$> 60 \sim 100$	$> 100 \sim 150$	> 150		≤ 16	$> 16 \sim 40$	$> 40 \sim 60$	$> 60 \sim 100$	$> 100 \sim 150$	> 150		
		不小于							不小于							
Q195	—	(195)	(185)	—	—	—	—	315 ~ 390	33	32	—	—	—	—	—	—
Q215	A	215	205	195	185	175	165	335 ~ 410	31	30	29	28	27	26	—	—
	B														20	27
Q235	A	235	225	215	205	195	185	375 ~ 400	26	25	24	23	22	21	—	27
	B														20	
	C														0	
	D														-20	
Q255	A	255	245	235	225	215	205	410 ~ 510	24	23	22	21	20	19	—	—
	B														20	27
Q275	—	275	265	255	245	235	225	490 ~ 610	20	19	18	17	16	15	—	—

表 4-29a 低合金结构钢力学性能(GB 1591—1994)

牌号	质量等级	屈服点 σ_s /MPa				抗拉强度 σ_b MPa	伸长率 δ_5 (%)	冲击吸收功, A_{KV} , (纵向)/J				180°弯曲试验 d = 弯心直径; a = 试样厚度(直径)	
		厚度(直径,边长)/mm						+ 20℃	0℃	- 20℃	- 40℃		
		≤ 16	> 16 ~ 35	> 35 ~ 50	> 50 ~ 100		不小于				钢材厚度(直径)/mm		
		不小于									≤ 16	> 16 ~ 100	
Q295	A	295	275	255	235	390 ~ 570	23					$d = 2a$	$d = 3a$
	B	295	275	255	235	390 ~ 570	23	34				$d = 2a$	$d = 3a$
Q345	A	345	325	295	275	470 ~ 630	21	34	34	34	27	$d = 2a$	$d = 3a$
	B	345	325	295	275	470 ~ 630	21					$d = 2a$	$d = 3a$
	C	345	325	295	275	470 ~ 630	22					$d = 2a$	$d = 3a$
	D	345	325	295	275	470 ~ 630	22					$d = 2a$	$d = 3a$
	E	345	325	295	275	470 ~ 630	22					$d = 2a$	$d = 3a$
Q390	A	390	370	350	330	490 ~ 650	19	34	34	34	27	$d = 2a$	$d = 3a$
	B	390	370	350	330	490 ~ 650	19					$d = 2a$	$d = 3a$
	C	390	370	350	330	490 ~ 650	20					$d = 2a$	$d = 3a$
	D	390	370	350	330	490 ~ 650	20					$d = 2a$	$d = 3a$
	E	390	370	350	330	490 ~ 650	20					$d = 2a$	$d = 3a$

(续)

牌号	质量等级	屈服点 σ_s /MPa				抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ_5 (%)	冲击吸收功, A_{KV} , (纵向)/J				180°弯曲试验 d = 弯心直径; a = 试样厚度(直径)		
		厚度(直径,边长)/mm						+ 20℃	0℃	- 20℃	- 40℃			
		≤ 16	> 16 ~ 35	> 35 ~ 50	> 50 ~ 100		不小于						钢材厚度(直径)/mm	
		不小于											≤ 16	> 16 ~ 100
Q420	A	420	400	380	360	520 ~ 680	18	34	34	34	27	$d = 2a$	$d = 3a$	
	B	420	400	380	360	520 ~ 680	18					$d = 2a$	$d = 3a$	
	C	420	400	380	360	520 ~ 680	19			$d = 2a$		$d = 3a$		
	D	420	400	380	360	520 ~ 680	19	34		$d = 2a$		$d = 3a$		
	E	420	400	380	360	520 ~ 680	19			$d = 2a$		$d = 3a$		
Q460	C	460	440	420	400	550 ~ 720	17	34	34	27	$d = 2a$	$d = 3a$		
	D	460	440	420	400	550 ~ 720	17						$d = 2a$	$d = 3a$
	E	460	440	420	400	550 ~ 720	17						$d = 2a$	$d = 3a$

表 4-29b GB/T 1591—1994 的牌号与 GB 1591—1988 标准中的对应牌号

GB/T 1591—1994	GB 1591—1988	GB/T 1591—1994	GB 1591—1988
Q295	09MnV、09MnNb、09Mn2、12Mn	Q420	15MnVN、14MnVTiRE
Q345	12MnV、14MnNb、16Mn、16MnRE、18Nb	Q460	—
Q390	15MnV、15MnTi、16MnNb		

表 4-30 易切削钢热轧态条钢、盘条硬度及力学性能(GB/T 8731—1988)

牌 号	力学性能			
	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ_5 (%) 不小于	收缩率 ϕ (%) 不小于	布氏硬度 HBW 不大于
Y12	390 ~ 540	22	36	170
Y12Pb	390 ~ 540	22	36	170
Y15	390 ~ 540	22	36	170
Y15Pb	390 ~ 540	22	36	170
Y20	450 ~ 600	20	30	175
Y30	510 ~ 655	15	25	187
Y35	510 ~ 655	14	22	187
Y40Mn	590 ~ 735	14	20	207
Y45Ca	600 ~ 745	12	26	211

表 4-31 易切削钢冷拉态硬度和纵向力学性能(GB/T 8731—1988)

牌 号	力学性能				布氏硬度 HBW
	抗拉强度 σ_b /MPa			伸长率 δ_5 (%) 不小于	
	钢材尺寸/mm				
	8 ~ 20	> 20 ~ 30	> 30		
Y12	530 ~ 755	510 ~ 735	490 ~ 685	7.0	152 ~ 217
Y12Pb	530 ~ 755	510 ~ 735	490 ~ 685	7.0	152 ~ 217
Y15	530 ~ 755	510 ~ 735	490 ~ 685	7.0	152 ~ 217
Y15Pb	530 ~ 755	510 ~ 735	490 ~ 685	7.0	152 ~ 217

(续)

牌 号	力学性能			布氏硬度 HBW	
	抗拉强度 σ_b /MPa		伸长率 δ_5 (%) 不小于		
	钢材尺寸/mm				
	8 ~ 20	> 20 ~ 30			> 30
Y20	570 ~ 785	530 ~ 745	510 ~ 705	7.0	167 ~ 217
Y30	600 ~ 825	560 ~ 765	540 ~ 735	6.0	174 ~ 223
Y35	625 ~ 845	590 ~ 785	570 ~ 765	6.0	176 ~ 229
Y45Ca	695 ~ 920	655 ~ 855	635 ~ 835	6.0	196 ~ 255

表 4-32 Y45Ca 易切削钢热处理后的力学性能

牌 号	力学性能				
	屈服点 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ_5 (%)	收缩率 ψ (%)	冲击吸收功 A_{KV} /J
	不 小 于				
Y45Ca	355	600	16	40	39

注:拉力试棒毛坯尺寸 $\phi 25\text{mm}$, $830 \sim 850^\circ\text{C}$, 30min 保温正火, 冲击试棒 $\phi 15\text{mm}$ 调质, $840 \pm 20^\circ\text{C}$ 淬火, 600°C 回火。

表 4-33 Y40Mn 易切削钢冷拉条钢高温回火态力学性能

牌 号	力学性能		硬度 HBW
	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ_5 (不小于)(%)	
Y40Mn	590 ~ 785	17	179 ~ 229

表 4-34 炉用耐热钢主要性能与用途

钢 号	力学性能 不小于					最高使用 温度 /℃	主要性能	主要用途
	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服点 σ_s /MPa	伸长率 δ (%)	收缩率 ψ (%)	冲击韧度 a_K /J·cm ⁻²			
1Cr13Si3	600	400	15	—	—	900	铁素体钢有晶粒长大倾向, 不宜承受冲击负荷, 但抗氧化性好, 在含硫的气氛中有好的抗蚀性, 宜于制作各种承受应力不大的炉用构件 奥氏体钢有较高的高温强度及抗氧化性, 对含硫气氛较敏感, 在 $600 \sim 800^\circ\text{C}$ 有析出相的脆化倾向, 宜于承受应力的各种炉用构件 节镍奥氏体钢, 有较高的高温强度和一定的抗氧化性, 并有较好的抗硫及抗增碳性	退火炉炉罩、托架、吊挂等
1Cr13SiAl	500	280	16	—	—	900		
1Cr18Si2	550	350	15	35	—	1050		
1Cr25Si2	500	350	15	—	—	1150		渗碳箱
1Cr23Ni13	550	250	35	50	—	1050		炉内传送带, 炉内支架等
1Cr20Ni14Si2	600	300	35	50	—	1050		各种热处理炉内构件, 吊架高温裂解炉炉管, 高温测温等, 退火炉炉罩, 高温加热炉管, 加热炉辊筒
3Cr18Ni25Si2	650	350	25	40	—	1100		
1Cr23Ni18	550	250	35	50	—	1100		
1Cr25Ni20Si2	600	300	35	50	—	1200		
3Cr18Mn12Si2N	700	400	35	45	—	1000		
2Cr20Mn9Ni2Si2N	650	400	35	40	—	1050		
								吊挂支架, 渗碳炉构件, 加热炉传送带, 料盘, 炉爪

4.5 非铁金属和合金的化学成分

1. 铜及铜合金化学成分(表 4-35 ~ 表 4-38)

表 4-35 纯铜化学成分表

序 号	类 别	牌 号	化学成分(质量分数)(%)					
			Cu + Ag	P	Bi	Sb	As	Fe
1	纯铜	T1	≥99.95	≤0.001	≤0.001	≤0.002	≤0.002	≤0.005
2		T2	≥99.90		≤0.001	≤0.002	≤0.002	≤0.005
3		T3	≥99.70		≤0.002	≤0.005	≤0.01	≤0.05
4	脱氧	TP1	≥99.90	0.005 ~ 0.012	≤0.002	≤0.002	≤0.002	≤0.01
5	纯铜	TP2	≥99.85	0.012 ~ 0.050	≤0.002	≤0.002	≤0.005	≤0.05

序 号	类 别	牌 号	化学成分(质量分数)(%)						
			Ni	Pb	Sn	S	Zn	O	杂质总和
1	纯铜	T1	≤0.002	≤0.003	≤0.002	≤0.002	≤0.005	≤0.02	≤0.05
2		T2	≤0.002	≤0.003	≤0.002	≤0.002	≤0.005	≤0.06	≤0.1
3		T3	≤0.2	≤0.01	≤0.05	≤0.01		≤0.1	≤0.3
4	脱氧纯铜	TP1	≤0.005	≤0.005	≤0.002	≤0.005	≤0.005	≤0.01	≤0.1
5		TP2	≤0.01	≤0.005	≤0.01	≤0.005		≤0.01	≤0.15

表 4-36 黄铜化学成分表

序 号	牌 号	化学成分(质量分数)(%)					
		Cu	Fe	Al	Sn	Mn	As
1	H96	95.0 ~ 97.0	≤0.10				0.03 ~ 0.06
2	H80	79.0 ~ 81.0	≤0.10				
3	H70	68.5 ~ 71.5	≤0.10				
4	H68	67.0 ~ 70.0	≤0.10				
5	H62	60.5 ~ 63.5	≤0.15				
6	HPb63—3	62.0 ~ 65.0	≤0.10	≤0.50			
7	HPb59—1	57.0 ~ 60.0	≤0.50	≤0.20			
8	HSn70—1	69.0 ~ 71.0	≤0.10		0.80 ~ 1.30		
8a	HSn62—1	61.0 ~ 63.0	≤0.10		0.70 ~ 1.10		
9	HA177—2	76.0 ~ 79.0	≤0.06	1.8 ~ 2.3			
10	HMn58—2	57.0 ~ 60.0	≤1.0			1.0 ~ 2.0	
11	HFe59—1—1	57.0 ~ 60.0	0.6 ~ 1.2	0.1 ~ 0.5	0.3 ~ 0.7	0.5 ~ 0.8	

序 号	牌 号	化学成分(质量分数)(%)					
		Pb	Sb	Bi	P	杂质总和	Zn
1	H96	≤0.03	≤0.005	≤0.002	≤0.01	≤0.2	余 量
2	H80	≤0.03	≤0.005	≤0.002	≤0.01	≤0.3	
3	H70	≤0.03	≤0.005	≤0.002	≤0.01	≤0.3	
4	H68	≤0.03	≤0.005	≤0.002	≤0.01	≤0.3	
5	H62	≤0.03	≤0.005	≤0.002	≤0.01	≤0.5	
6	HPb63—3	2.4 ~ 3.0	≤0.005	≤0.002	≤0.01	≤0.75	
7	HPb59—1	0.8 ~ 1.9	≤0.01	≤0.003	≤0.02	≤1.0	
8	HSn70—1	≤0.05	≤0.005	≤0.002	≤0.01	≤0.3	
8a	HSn62—1	≤0.10	≤0.005	≤0.002	≤0.01	≤0.3	
9	HA177—2	≤0.05	≤0.05	≤0.002	≤0.02	≤0.3	
10	HMn58—2	≤0.10	≤0.005	≤0.002	≤0.01	≤1.2	
11	HFe59—1—1	≤0.20	≤0.01	≤0.003	≤0.01	≤0.3	

表 4-37 铸造铜合金化学成分表

序号	牌 号	化学成分(质量分数)(%)						
		Cu	Si	Fe	Al	Sb	Sn	Pb
1	ZCuZn16Si4	79.0 ~ 81.0	2.5 ~ 4.5	≤0.6	≤0.1	≤0.1	≤0.3	≤0.5
2	ZCuAl10Fe3	余	≤0.2	2.0 ~ 4.0	8.5 ~ 11.0		≤0.3	≤0.2
3	ZCuSn5Pb5Zn5		≤0.01	≤0.3	≤0.01		4.0 ~ 6.0	4.0 ~ 6.0
4	ZCuSn6Zn6Pb3	量	≤0.05	≤0.4	≤0.05	≤0.3	5.0 ~ 7.0	2.0 ~ 4.0
5	ZCuSn10P1		≤0.02	≤0.1	≤0.01	≤0.05	9.0 ~ 11.5	≤0.25
6	ZCuSn10Zn2	余	≤0.01	≤0.25	≤0.01	≤0.3	9.0 ~ 11.5	≤1.5
7	ZCuPb10Sn10		≤0.01	≤0.25	≤0.01	≤0.50	8.0 ~ 11.0	8.0 ~ 11.0
8	ZCuPb25Sn5	量	≤0.02	≤0.2	≤0.02	≤0.3	4.0 ~ 6.0	23.0 ~ 27.0

序号	牌 号	化学成分(质量分数)(%)							
		Mn	Zn	Ni	S	P	Bi	Mg	杂质总和
1	ZCuZn16Si4	≤0.5	余量						≤2.0
2	ZCuAl10Fe3	≤1.0	≤0.4	≤3.0					≤1.0
3	ZCuSn5Pb5Zn5		4.0 ~ 6.0	≤2.5	≤0.10	≤0.05			≤1.0
4	ZCuSn6Zn6Pb3		5.0 ~ 7.0			≤0.05			≤1.0
5	ZCuSn10P1	≤0.05		≤0.1	≤0.05	0.5 ~ 1.0			≤0.75
6	ZCuSn10Zn2		1.0 ~ 3.0	≤2.0			≤0.03		≤1.5
7	ZCuPb10Sn10		≤2.0	≤2.0		≤0.05			≤1.0
8	ZCuPb25Sn5				≤0.05	≤0.08	≤0.005	≤0.02	≤0.75

表 4-38 青铜、白铜、镍铜合金化学成分表

序号	牌 号	化学成分(质量分数)(%)						
		Sn	Zn	Pb	Al	Fe	Sb	Bi
		青 铜						
1	QSn4—4—2.5	3.0 ~ 5.0	3.0 ~ 5.0	1.5 ~ 3.5	≤0.002	≤0.05	≤0.002	≤0.002
2	QSn4—0.3	3.5 ~ 4.5		≤0.02	≤0.002	≤0.02	≤0.002	≤0.002
3	QSn4—3	3.5 ~ 4.5	2.7 ~ 3.3	≤0.05	≤0.002	≤0.05	≤0.002	≤0.002
4	QSn6.5—0.1	6.0 ~ 7.0		≤0.02	≤0.002	≤0.02	≤0.002	≤0.002
5	QSn6.5—0.4	6.0 ~ 7.0		≤0.02	≤0.002	≤0.05	≤0.002	≤0.002
6	QSn7—0.2	6.0 ~ 8.0		≤0.02	≤0.01	≤0.05	≤0.002	≤0.002
7	QAl7	≤0.1	≤0.5	≤0.03	6.0 ~ 8.0	≤0.5		
8	QAl9—4	≤0.1	≤1.0	≤0.01	8.0 ~ 10.0	2.0 ~ 4.0		
9	QAl10—3—1.5		≤0.5	≤0.03	8.5 ~ 10.0	2.0 ~ 4.0		
10	QAl10—4—4	≤0.1	≤0.5	≤0.02	9.5 ~ 11.0	3.5 ~ 5.5		
11	QBe1.9			≤0.005	≤0.15	≤0.15		
12	QBe1.9—0.1			≤0.005	≤0.15	≤0.15		
13	QBe2			≤0.005	≤0.15	≤0.15		
14	QSi1—3	≤0.1	≤0.2	≤0.15	≤0.02	≤0.1		
15	QSi3—1		≤0.5	≤0.03		≤0.3		
16	QZr0.2	≤0.05	Zr0.15 ~ 0.3	≤0.01		≤0.05	≤0.005	≤0.002
17	QCr0.5	Cr0.4 ~ 1.1				≤0.1		
18	QCd1	Cd0.8 ~ 1.3						
白 铜								
1	BZn15—20	Mg≤0.05	余量	≤0.02	As≤0.01	≤0.5	≤0.002	≤0.002
2	BFe30—1—1	≤0.03	≤0.3	≤0.02		0.5 ~ 1.0		
镍 铜 合 金								
1	NiCu28—2.5—1.5	Mg≤0.10		≤0.002	As≤0.01	2.0 ~ 3.0	≤0.002	≤0.002

表 4-39 变形铝及铝合金化学成分表

序号	新牌号	旧牌号	化学成分(质量分数)(%)						
			Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ni
1	1A50	L3	≤0.015			≤0.30	≤0.30		
2	1035	L4	≤0.05			≤0.35	≤0.40		
3	1200	L5	≤0.05			≤0.50	≤0.50		
4	—	L6	≤0.10	≤0.10	≤0.10	≤0.50	≤0.55	≤0.10	
5	2A02	LF2	≤0.10	2.0~2.8	0.15~0.40	≤0.40	≤0.40		
6	5A03	LF3	≤0.10	3.2~3.8	0.30~0.60	≤0.50	0.50~0.80	≤0.20	
7	5A05	LF5	≤0.10	4.8~5.5	0.30~0.60	≤0.50	≤0.50	≤0.20	
8	5A06	LF6	≤0.10	5.8~6.8	0.50~0.80	≤0.40	≤0.40	≤0.20	
9	5B05	LF10	≤0.20	4.7~5.7	0.20~0.60	≤0.40	≤0.40		
10	3A21	LF21	≤0.20	≤0.05	1.00~1.60	≤0.70	≤0.60	≤0.10	
11	2A01	LY1	2.2~3.0	0.20~0.5	≤0.20	≤0.50	≤0.50	≤0.10	
12	2A10	LY2	2.6~3.2	2.0~2.4	0.45~0.70	≤0.30	≤0.30	≤0.10	
13	2A10	LY10	3.9~4.5	0.15~0.30	0.30~0.50	≤0.20	≤0.25	≤0.10	
14	2A11	LY11	3.8~4.8	0.4~0.8	0.40~0.80	≤0.70	≤0.70	≤0.30	≤0.10
15	2A12	LY12	3.8~4.9	1.2~1.8	0.30~0.90	≤0.50	≤0.50	≤0.30	≤0.10
16	2A12	LY16	6.0~7.0	≤0.05	0.40~0.80	≤0.30	≤0.30	≤0.10	
17	7A04	LC4	1.40~2.00	1.80~2.80	0.20~0.60	≤0.50	≤0.50	5.0~7.0	
18	7A09	LC9	1.20~2.00	2.00~3.00	≤0.15	≤0.50	≤0.50	5.1~6.1	
19	6A02	LD2	0.20~0.60	0.45~0.90	0.15~0.35	≤0.50	0.50~1.20	≤0.20	
20	2A50	LD5	1.80~2.60	0.40~0.80	0.40~0.80	≤0.70	0.70~1.20	≤0.30	≤0.10
21	2B50	LD6	1.80~2.60	0.40~0.80	0.40~0.80	≤0.70	0.70~1.20	≤0.30	≤0.10
22	2A70	LD7	1.90~2.50	1.40~1.80	≤0.20	0.90~1.5	≤0.35	≤0.30	0.90~1.50
23	2A14	LD10	3.90~4.80	0.40~0.80	0.40~1.00	≤0.70	0.60~1.20	≤0.30	≤0.10

(续)

序号	新牌号	旧牌号	化学成分(质量分数)(%)							
			Cr	Ti	Be	Zr	Fe + Si	其他杂质		Al
								单个	合计	
1	1A50	L3					≤0.45	≤0.03		≥99.5
2	1035	L4					≤0.60	≤0.03		≥99.3
3	1200	L5					≤0.90	≤0.05	≤0.15	≥99.0
4	2A06	L6					≤1.00	≤0.05	≤0.15	≥98.8
5	5A02	LF2	或 Mn	≤0.15			≤0.60	≤0.05	≤0.15	余 量
6	5A03	LF3		≤0.15				≤0.05	≤0.10	
7	5A05	LF5						≤0.05	≤0.10	
8	5A06	LF6		0.02 ~ 0.10	0.0001 ~ 0.005			≤0.05	≤0.10	
9	5B05	LF10		≤0.15			≤0.60	≤0.05	≤0.10	
10	3A21	LF21		≤0.15				≤0.05	≤0.10	
11	2A01	LY1		≤0.15				≤0.05	≤0.10	
12	2A02	LY2		≤0.15				≤0.05	≤0.10	
13	2A10	LY10		≤0.10				≤0.05	≤0.10	
14	2A11	LY11		≤0.15			Fe + Ni ≤ 0.7	≤0.05	≤0.10	
15	2A12	LY12		≤0.15			Fe + Ni ≤ 0.5	≤0.05	≤0.10	
16	2A16	LY16		0.1 ~ 0.2		≤0.2		≤0.05	≤0.10	
17	7A04	LC4	0.10 ~ 0.25					≤0.05	≤0.10	
18	7A09	LC9	0.16 ~ 0.30					≤0.05	≤0.10	
19	6A02	LD2	或 Mn	≤0.15				≤0.05	≤0.10	
20	2A50	LD5		≤0.15			≤0.70	≤0.05	≤0.10	
21	2B50	LD6	0.01 ~ 0.20	0.02 ~ 0.10			≤0.70	≤0.05	≤0.10	
22	2A70	LD7		0.02 ~ 0.10				≤0.05	≤0.10	
23	2A14	LD10		≤0.15				≤0.05	≤0.10	

表 4-40 美、俄 Al-Li 系合金的成分及性能

[illegible]

(续)

合金牌号		化学成分(质量分数)								热 处 理	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ (%)	K_{IC} /MPa \sqrt{m}	$\rho/g \cdot$ cm^{-3}	E /GPa	
		Li	Cu	Mg	Zr	Mn	Fe	Si	Cd /Ti								
美 Alean 公司	litalB 8091	2.4	1.6	0.5	0.08	—	<	<	—	T8 板、纵	560	520	4.0	28	2.55	—	
		~	~	~	~	—	0.3	0.2	—								
		2.8	2.2	1.2	0.16	—	—	—	—								
	litalC	2.3	1.0	0.5	0.08	—	<	<	—	450	400	5.0	45	2.54	—		
		~	~	~	~	—	0.3	0.2	—								
		2.6	1.6	1.0	0.16	—	—	—	—								
美 Pech- iney 公司	CP271 8090	2.2	1.0	0.6	0.04	—	<	<	—	T6 薄板 T651 薄板	555	445	7	37	2.52	81.2	
		~	~	~	~	—	0.3	0.2	—		540	490	7	37	~		
		2.7	1.6	1.3	0.16	—	—	—	—		—	—	—	—	2.54		
	CP274 2091	1.7	1.8	1.1	0.04	—	<	<	—	T651 薄板	480	430	12	—	2.57	78.8	
		~	~	~	~	—	0.3	0.2	—						~		
		2.3	2.5	1.9	0.16	—	—	—	—						2.59		
	CP276	1.9	2.5	0.2	0.04	—	<	<	—	T651	600	575	5	—	2.57	80.2	
		~	~	~	~	—	0.3	0.2	—		~	~			~		
			3.3	3.3	0.8	0.16	—	—	—	—	655	625			2.60		
	2020		0.9	1.0	0.03		0.3	0.4	0.4	0.1~	T6	561	505	13	20.8	2.67	78.1
~			~	~			0.25										
1.7			5.0	0.8			0.1										
1.0			4.9	0.4			0.1~										
俄 ВАД23		~	~	0.05		~	0.3	0.3	0.3	—	—	—	—	—	—	—	
		1.4	5.8			0.8			0.15								

注: T8—固溶热处理后经冷加工, 然后进行人工时效的状态; T6—固溶热处理后进行人工时效的状态。

表 4-41 美国常用变形铝合金的牌号及化学成分

牌号	国内相应牌号	化学成分(质量分数)(%)							
		Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Cr	Ti
2014	2A14(LD10)	0.25	0.20~0.8	3.9~5.0	0.7	0.50~1.2	0.40~1.2	0.10	0.15
2024	2A12(LY12)	0.25	1.2~1.8	3.8~4.9	0.50	0.50	0.30~0.90	0.10	—
2124	(高纯 LY12)	0.25	1.2~1.8	3.8~4.9	0.30	0.20	0.30~0.90	0.10	—
2219	2A16(LY16)	0.10	0.02	5.8~6.8	0.30	0.20	0.20~0.4	—	0.02~0.10
2618	2A70(LD7)	—	1.3~1.8	1.9~2.7	0.9~1.3	0.25	—	—	0.04~0.10
2648		0.25	1.5	3.3	0.20	0.15	0.4	—	—
5052	5A02(LF2)	0.10	2.2~2.8	0.10	0.45Fe+Si	—	0.10	0.15~0.35	—
5056	5B05(LF10)	0.25	4.7~5.5	0.10	0.40Fe+Si	—	0.5~1.0	0.05~0.20	0.20
6061	6A02(LD2)	0.25	0.8~1.2	0.15~0.40	0.70	0.40~0.80	0.15	0.04~0.35	0.15
7075	7A04(LC4)	5.1~6.1	2.1~2.9	1.2~2.0	0.50	0.40	0.30	0.18~0.35	0.20
7079		3.8~4.8	2.9~3.7	0.40~0.8	0.40	0.30	0.10~0.30	0.10~0.25	0.10
7175		5.1~6.1	2.1~2.9	1.2~2.0	0.20	0.15	0.10	0.18~0.30	0.10
7475		5.2~6.2	1.9~2.6	1.2~1.9	0.12	0.10	0.06	0.18~0.25	0.06
7049		7.2~8.2	2.0~2.9	1.2~1.9	0.35	0.25	0.20	0.10~0.22	0.10
7050		5.7~6.7	1.9~2.6	2.0~2.8	0.15	0.12	0.10	0.04	0.06

表 4-42 国外常用 Al-Zn-Mg 系焊接合金的化学成分及力学性能

牌 号	国 别	主要成分(质量分数)(%)								σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ (%)	状态 ^①
		Zn	Mg	Mn	Cr	Zr	Cu	Ti	Zn/Mg				
AlZnMgI	德	4.7	1.4	0.3	0.1	—	0.1	—	3.36	360	280	12.0	AA
Unidur	瑞士	4.7	1.4	0.4	0.1	—	0.05	—	3.36	360	280	12.0	AA
7039	美	4.0	2.8	0.3	0.2	—	≤0.1	—	1.43	420	350	14.0	AA
7005		4.5	1.4	0.4	0.1	0.15	—	—	3.21	400	325	14.0	AA
7004	加	4.2	1.5	0.45	—	0.15	—	—	2.8	395	330	14.0	AA
7003	日	5.75	0.75	0.4	—	0.15	—	—	7.7	390	330	16.5	AA
JIS7Nol		4.4	1.6	0.55	<0.3	<0.3	<0.25	<0.2	2.75	340	280	10.6	T6
AZ4G	法	3.0	1.5	0.3	0.2	—	0.2	—	2.0	350	220	17.0	NA
AZ5G		4.6	1.2	<0.2	0.25	0.15	<0.1	<0.1	3.83	400	350	14.3	T6
74S	加	4.3	1.7	0.3	—	—	0.1	—	2.53	390	320	15.0	AA
1911	俄	4.1	1.85	0.35	0.16	0.18	0.15	—	2.22	425	360	13.0	AA
1915		3.7	1.55	0.4	0.14	0.18	0.10	—	2.38	350	210	14.0	AA
B92H		3.3	4.3	0.7	—	0.15	0.05	—	0.77	400	300	10.0	AA

① AA—人工时效;NA—自然时效;T6—固溶热处理后进行人工时效的状态。

表 4-43 铸造铝合金化学成分表

序号	牌 号	化学成分(质量分数)(%)						
		Cu	Mg	Mn	Si	Zn	Ti	Sn
1	ZL101	≤0.20	0.20~0.40	≤0.50	6.50~7.50	≤0.30	≤0.15	≤0.01
2	ZL101A	≤0.10	0.20~0.45	≤0.10	6.50~7.50	≤0.10	0.50~0.20	≤0.05
3	ZL102	≤0.30	≤0.10	≤0.50	10.0~13.0	≤0.10		
4	ZL104	≤0.10	0.17~0.30	0.20~0.50	8.0~10.5	≤0.30	≤0.15	≤0.01
5	ZL105	1.00~1.50	0.40~0.60	≤0.50	4.50~5.50	≤0.30	≤0.15	≤0.01
6	ZL201	4.50~5.30	≤0.05	0.60~1.00	≤0.30	≤0.20	0.15~0.35	
7	ZL201A	4.80~5.30	≤0.05	0.60~1.00	≤0.10	≤0.10	0.15~0.35	
8	ZL204A	4.60~5.30	≤0.05	0.60~0.90	≤0.06	≤0.10	0.15~0.35	Cd 0.15~0.25
9	ZL205A	4.60~5.30	≤0.06	0.30~0.50	≤0.06	≤0.05	0.15~0.35	Cd 0.15~0.25
10	ZL207	3.00~3.40	0.15~0.25	0.90~1.20	1.60~2.00	≤0.20	0.15~0.25	
11	ZL208	4.50~5.50		0.20~0.30	≤0.30	Co 0.10~0.40	0.15~0.25	Sb 0.10~0.40
12	ZL303	≤0.10	4.50~5.50	0.10~0.40	0.80~1.30	≤0.20	≤0.20	
13	ZL401	≤0.60	0.10~0.30	≤0.50	6.00~8.00	7.0~12.0		

序号	牌 号	化学成分(质量分数)(%)								
		Pb	Ni	Zr	RE	Ti + Zr	Fe		其 他	
							S、R ^①	J ^②	单个	合计
1	ZL101	≤0.05	Be≤0.1			≤0.15	≤0.50	≤0.90	≤0.05	≤0.15
2	ZL101A	≤0.05	≤0.05				≤0.20	≤0.20	≤0.05	≤0.15
3	ZL102			≤0.10			≤0.70	≤1.00	≤0.10	≤0.50
4	ZL104	≤0.05				≤0.15	≤0.60	≤0.90	≤0.05	≤0.15

余量

(续)

序号	牌 号	化学成分(质量分数)(%)									
		Pb	Ni	Zr	RE	Ti + Zr	Fe		其 他		Al
							S、R ^①	J ^②	单个	合计	
5	ZL105	≤0.05				≤0.15	≤0.60	≤1.00	≤0.05	≤0.15	余
6	ZL201		≤0.10	≤0.20			≤0.30		≤0.05	≤0.15	
7	ZL201A		≤0.05	≤0.15			≤0.15		≤0.05	≤0.10	
8	ZL204A		≤0.05	≤0.15			≤0.12		≤0.05	≤0.10	
9	ZL205A	V 0.05 ~ 0.30	≤0.05	0.05 ~ 0.20	B 0.005 ~ 0.06		≤0.15	≤0.15	≤0.05	≤0.30	量
10	ZL207	Co + Sb ≤0.60	0.20 ~ 0.30	0.15 ~ 0.25	4.40 ~ 5.0		≤0.60	≤0.60	≤0.05	≤0.15	
11	ZL208		1.30 ~ 1.80	0.10 ~ 0.30		≤0.50	≤0.50	≤0.50	≤0.05	≤0.15	
12	ZL303						≤0.50	≤0.50	≤0.05	≤0.15	
13	ZL401						≤0.80	≤1.20	≤0.10	≤0.30	

① S—砂型铸造, R—熔模铸造。

② J—金属型铸造。

表 4-44 铸造铝合金杂质允许含量

合金牌号	合金代号	杂质含量不大于(质量分数)(%)																杂质总和	
		Fe		Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	Zr	Ti + Zr	Be	Ni	Sn	Pb	其他	S	I	
		S	J														S	I	
ZAlSi7Mg	ZL101	0.5	0.9		0.2		0.3	0.35			0.15	0.1		0.01	0.05		1.0	1.4	
ZAlSi7MgA	ZL101A	0.2	0.2		0.1		0.1	0.10						0.01	0.03		0.6	0.6	
ZAlSi12	ZL102	0.7	1.0		0.30	0.10	0.1	0.5	0.20								2.0	2.2	
ZAlSi9Mg	ZL104	0.6	0.9		0.1		0.25				0.15			0.01	0.05		1.1	1.4	
ZAlSi5Cu1Mg	ZL105	0.6	1.0				0.3	0.5			0.15	0.1		0.01	0.05		1.1	1.4	
ZAlSi5Cu1MgA	ZL105A	0.2	0.2				0.1	0.1						0.01	0.05		0.5	0.5	
ZAlSi8Cu1Mg	ZL106	0.6	0.8				0.2							0.01	0.05		0.9	1.0	
ZAlSi7Cu4	ZL107	0.5	0.6			0.1	0.3	0.5						0.01	0.05		1.0	1.2	
ZAlSi12Cu2Mg1	ZL108		0.7				0.2		0.20				0.3	0.01	0.05			1.2	
ZAlSi12Cu1Mg1Ni1	ZL109		0.7				0.2	0.2	0.20					0.01	0.05			1.2	
ZAlSi9Cu2Mg	ZL111	0.4	0.4				0.1							0.01	0.05		1.0	1.0	
ZAlSi7Mg1A	ZL114A	0.2	0.2		0.2		0.1	0.1								每种 0.05 共 0.15	0.75	0.75	
ZAlSi5Zn1Mg	ZL115	0.3	0.3		0.1			0.1						0.01	0.05		0.8	1.0	
ZAlSi8MgBe	ZL116	0.60	0.60		0.3		0.3	0.1		0.20				0.01	0.05	B 0.10	1.0	1.0	
ZAlCu5Mn	ZL201	0.25	0.3	0.3		0.05	0.2			0.2			0.1				1.0	1.0	
ZAlCu5MnA	ZL201A	0.15		0.1		0.05	0.1			0.15			0.05				0.4		
ZAlCu10	ZL202	1.0	1.2	1.2		0.3	0.8	0.5					0.5				2.8	3.0	
ZAlCu4	ZL203	0.8	0.8	1.2		0.05	0.25	0.1	0.20	0.1				0.01	0.05		2.1	2.1	
ZAlCu5MnCdA	ZL204A	0.12	0.12	0.06		0.05	0.1			0.15			0.05				0.4		
ZAlCu5MnCdVA	ZL205A	0.15	0.15	0.06		0.05										每种 0.05	0.3	0.3	
ZAlR5Cu3Si2	ZL207	0.6	0.6				0.2										0.8	0.8	
ZAlMg10	ZL301	0.3	0.3	0.30	0.10		0.15	0.15	0.15	0.20		0.07	0.05	0.01	0.05		1.0	1.0	

(续)

合金牌号	合金代号	杂质含量不大于(质量分数)(%)															杂质总和	
		Fe		Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	Zr	Ti + Zr	Be	Ni	Sn	Pb	其他	S	J
		S	J															
ZAlMg5Si1	ZL303	0.5	0.5		0.1		0.2		0.2								0.7	0.7
ZAlMg8Zn1	ZL305	0.3		0.2	0.1			0.1									0.9	
ZAlZn11Si7	ZL401	0.7	1.2		0.6			0.5									1.8	2.0
ZAlZn6Mg	ZL402	0.5	0.8	0.3	0.25			0.1								每种 0.05 共 0.15	1.35	1.65

注:熔模、壳型铸造的主要元素及杂质含量按砂型指标检验。

S—砂型铸造;J—金属型铸造。

3. 钛和钛合金的化学成分和用途(表 4-45 和表 4-46)

表 4-45 钛及钛合金化学成分

序号	类别	牌号	合金元素(质量分数)(%)						
			Mo	Cr	V	Sn	Al	Zr	Fe
1	工业纯钛	TA1							
2		TA2							
3		TA3							
4		ZTA1							
5		ZTA2							
6		ZTA3							
7	α 型	TA7			Mn0.7~2.0	2.0~3.0	4.0~6.0		
8		TC1					1.0~2.5		
9	β 型	TB2	4.8~5.8	7.5~8.5	4.8~5.8		2.5~3.5		
10		Ti-22	9.5~10.5		7.5~8.5		3.2~3.7		0.8~1.2
11		47121	6.0~7.8		9.0~10.5		3.0~4.5	0.5~1.5	1.5~2.5
12	$\alpha+\beta$ 型	TC3			3.5~4.5		4.5~6.0		
13		TC4			3.5~4.5		5.5~6.8		
14		TC6	2.0~3.0	0.8~2.3			5.5~7.0		0.2~0.7
15		TC11	2.8~3.8				5.8~7.0	0.8~2.0	
16		ZTC4			3.5~4.5		5.5~6.8		
17		ZT3	4.5~5.5			1.5~2.5	4.5~5.5		

序号	类别	牌号	合金元素(质量分数)(%)			杂质(质量分数)%不大于						
			Si	Ce	Ti	Si	C	N	H	O	Fe	其他
1	工业纯钛	TA1			基 体	0.10	0.05	0.03	0.015	0.15	0.15	
2		TA2				0.15	0.10	0.05	0.015	0.20	0.30	
3		TA3				0.15	0.10	0.05	0.015	0.30	0.40	
4		ZTA1				0.10	0.10	0.03	0.015	0.25	0.30	
5		ZTA2				0.15	0.10	0.05	0.015	0.35	0.30	
6		ZTA3				0.15	0.10	0.05	0.015	0.40	0.50	

(续)

序号	类别	牌号	合金元素(质量分数)(%)			杂质(质量分数)%不大于						
			Si	Ce	Ti	Si	C	N	H	O	Fe	其他
7	α 型	TA7			余量	0.15	0.10	0.05	0.015	0.20	0.30	
8		TC1				0.15	0.10	0.05	0.012	0.15	0.30	
9	β 型	TB2			余量	0.10	0.05	0.04	0.015	0.15	0.3	
10		Ti-22				0.10	0.05	0.04	0.015	0.18		
11		47121				0.15	0.05	0.04	0.015	0.20		
12	$\alpha+\beta$ 型	TC3			余量	0.15	0.1	0.05	0.015	0.15	0.3	0.40 0.30 0.30 0.40
13		TC4				0.15	0.1	0.05	0.015	0.20	0.3	
14		TC6	0.15~0.4				0.1	0.05	0.015	0.18		
15		TC11	0.20~0.35				0.1	0.05	0.012	0.15	0.25	
16		ZTC4				0.15	0.1	0.05	0.015	0.20	0.30	
17		ZT3	0.2~0.35	0.015~0.03			0.1	0.05	0.0125	0.18	0.2	

表 4-46 钛及其合金的用途

合金系和类型	代 号	产 品 种 类	用 途 举 例
工业纯钛(α 型)	TA1 TA2 TA3	板、带、管、棒、线、铸件	350℃以下工作的受力小的零件及冲压件,飞机骨架、蒙皮、发动机部件;船舶用耐海水腐蚀的管道、阀门、泵、水翼;化工热交换器、泵体、蒸馏塔;海水淡化系统;柴油发动机活塞、连杆、叶簧;造纸混合器;化工用冷却器、搅拌器、三通、离子泵、压缩机气阀等
钛铝合金(α 型)	TA6	板、棒、管、锻件	飞机蒙皮、骨架零件、压气机壳体、叶片和焊接的在400℃以下工作的各种零件
钛铝锡合金(α 型)	TA7	板、棒、线、锻件、铸件	500℃以下长期工作的结构件和各种模锻件
钛铝锰合金($\alpha+\beta$ 型)	TC1	板、棒、管	400℃以下工作的板、冲压和焊接零件
	TC2	板、棒	500℃以下工作的焊接件、模锻件和经弯曲加工的各种零件
钛铝钒合金($\alpha+\beta$ 型)	TC4	板、棒、锻件、铸件	400℃以下长期工作的零件;结构用的锻件;各种容器、泵、低温部件;舰艇耐压壳体、坦克履带等
	TC10	板、棒、管	450℃以下长期工作的零件,如飞机结构零件、起落支架、蜂窝联结件、导弹发动机外壳、武器结构件等
钛铝铬合金($\alpha+\beta$ 型)	TC5	厚板、棒、锻件	350℃以下工作的零件

4. 镁合金的化学成分(表 4-47 和表 4-48)

表 4-47 铸造镁合金化学成分

序号	牌号	合金元素(质量分数)(%)								
		Al	Zn	Mn	Ag	RE	Nd	Zr 总量	Zr 溶解	Mg
1	ZM1		3.50~5.50					0.50~1.00	≥0.50	余
2	ZM2		3.50~5.0			0.70~1.70		0.50~1.00	≥0.50	量

(续)

序号	牌号	合金元素(质量分数)(%)								
		Al	Zn	Mn	Ag	RE	Nd	Zr 总量	Zr 溶解	Mg
3	ZM3	7.50 ~ 9.00	0.20 ~ 0.70	0.15 ~ 0.50	0.60 ~ 1.20	2.50 ~ 4.00	2.00 ~ 2.80	0.30 ~ 1.00	≥ 0.30	余量
4	ZM4		2.00 ~ 3.00			2.50 ~ 4.00		0.50 ~ 1.00	≥ 0.50	
5	ZM5		0.20 ~ 0.80							
6	ZM6		0.20 ~ 0.70							
7	ZM7		7.5 ~ 9.0							
8	ZM8		5.50 ~ 6.00						2.00 ~ 3.00	

序号	牌号	杂质(质量分数)(%)不大于						
		Cu	Ni	Si	Fe	Be	Al	其他
1	ZM1	0.03	0.03	0.01	0.01	0.001	0.05	0.05
2	ZM2	0.03	0.01	0.01	0.01	0.001		0.05
3	ZM3	0.03	0.01	0.01	0.01	0.001		0.05
4	ZM4	0.03	0.01	0.01	0.01	0.001		0.05
5	ZM5	0.1	0.01	0.25	0.08	0.002		0.1
6	ZM6	0.03	0.01	0.01	0.01	0.001		0.05
7	ZM7	0.01	0.01	0.01	0.01			0.3
8	ZM8	0.03	0.01	0.01	0.01	0.001		0.05

表 4-48 变形镁合金化学成分

序号	牌号	合金元素(质量分数)(%)							杂质(质量分数)(%)不大于	
		Al	Mn	Zn	Zr	Y	Mg	Ce	Cu	Ni
1	MB2	3.0~4.0	0.15~0.5	0.2~0.8			余 量	0.15~0.35	0.05	0.005
2	MB3	3.7~4.7	0.3~0.6	0.8~1.4					0.05	0.005
3	MB8	1.3~2.2	5.0~6.0	0.3~0.9					0.05	0.005
4	MB15			1.2~1.6	0.45~0.8	2.9~3.5			0.01	0.005
5	MB22			5.6~6.4	≥0.45	0.7~1.7			0.05	0.005
6	MB25									

序号	牌号	杂质(质量分数)(%)不大于								
		Si	Fe	Be	Al	Mn	K	Na	Ca	其他
1	MB2	0.1	0.05	0.01	0.2	Zn0.3	0.2	0.05	0.02	0.30
2	MB3	0.1	0.05	0.01						0.30
3	MB8	0.1	0.05	0.01						0.30
4	MB15	0.1	0.05	0.01	0.05	0.1	0.2	0.05	0.02	0.30
5	MB22	0.01	0.01							
6	MB25	0.05	0.05	0.02	0.05	0.1				0.20

5. 部分镍及其合金的化学成分(表 4-49)

表 4-49 部分镍及其合金化学成分和用途

代 号	主要成分(质量分数)(%)				杂质(质量分数)(%)(不大于)					加工产品	用途举例
	Ni + Co	Cu	Mn	Fe	Pb	Bi	C	S	总和		
N2	不小于 99.98				0.0003	0.0003	0.005	0.001	0.02	板、带	机械、化工设备耐蚀结构件,精密仪器结构件,电子管及无线电设备零件,医疗器械,食品工业器皿
N4	不小于 99.9				0.001	0.001	0.01	0.001	0.1	板、带	
N6	不小于 99.5				0.002	0.002	0.10	0.005	0.5	板、带、箔、管、棒、线	
N8	不小于 99.0						0.20	0.015	1.0	板、带、棒、线	

(续)

代 号	主要成分(质量分数)(%)				杂质(质量分数)(%)(不大于)					加工产品	用途举例
	Ni + Co	Cu	Mn	Fe	Pb	Bi	C	S	总和		
NMn3	余量		2.30 ~ 3.30		0.002	0.002	0.30	0.03	1.50	线	内燃机火花塞
NMn5	余量		4.60 ~ 5.40		0.002	0.002	0.30	0.03	2.0	线	
NCu 40—2—1	余量	38.0 ~ 42.0	1.25 ~ 2.25	≤1.0			0.30	0.024		板、带、箔、管、棒、线	抗磁性零件
NCu28— 2.5—1.5	余量	27.0 ~ 29.0	1.20 ~ 1.80	2.0 ~ 3.0	0.002	0.002	0.20	0.01	0.6	板、带、箔、管、棒、线	高强度耐蚀零件、高压充油电缆、供油槽、加热设备和医疗器械零件

6. 锌合金的化学成分(表 4-50 ~ 表 4-52)

表 4-50 铸造锌合金化学成分及用途

代 号	主要成分(质量分数)(%)				用 途 举 例
	Al	Cu	Mg	Zn	
ZZnAl10—5	9.0 ~ 12.0	4.0 ~ 5.5	0.03 ~ 0.06	余量	切削机床、压力机、起重机、轧机等轴承($p_v \leq 100$)
ZZnAl9—1.5	8.0 ~ 11.0	1.0 ~ 2.0	0.03 ~ 0.06	余量	
ZZnAl4—1	3.5 ~ 4.5	0.73 ~ 1.25	0.03 ~ 0.08	余量	机架、支架、盖子、齿轮箱、打字机、印刷机、仪器外壳及零件。汽车汽化器、机油泵体、仪表等压铸件
ZZnAl4—0.5	3.5 ~ 4.5	0.5 ~ 0.9	0.08 ~ 0.15	余量	
ZZnAl4	3.5 ~ 4.5		0.03 ~ 0.08	余量	

注:前两个牌号为轴承合金,后三个牌号多用作压力铸造合金,压力铸造的浇注温度为 393 ~ 427℃。

表 4-51 锌板化学成分和用途

名 称	代号	主要成分(质量分数)(%)						杂质(质量分数)(%)(不大于)			用途举例
		Zn	Pb	Cd	Fe	Al	Mg	Cu	Sn	总和	
电池锌板	XD1	余量	0.3 ~ 0.5	0.2 ~ 0.35				0.002	0.002	0.05	锌锰干电池负极,印花锌板
	XD2	余量	0.35 ~ 0.8	0.03 ~ 0.06	0.008 ~ 0.018			0.002	0.003	0.03	
照相制板用锌板	X11	余量	0.2 ~ 0.5	0.12 ~ 0.35	0.012 ~ 0.02			0.003	0.004	0.05	有粉腐蚀照相制板
照相制板用微晶锌板	X12	余量				0.02 ~ 0.10	0.06 ~ 0.15	0.0015		0.05	有粉及无粉腐蚀照相制板
胶印锌板		余量	0.3 ~ 0.5	0.1 ~ 0.15	0.008 ~ 0.02			0.005	0.003	0.05	胶印印刷板

表 4-52 锌合金加工产品化学成分及用途

组 别	代 号	主要成分(质量分数)(%)				产 品 及 用 途
		Al	Cu	Mg	Zn	
锌铜合金	ZnCu1.5		1.2~1.7		余量	带材,日用五金
	ZnCu1.2		1.0~1.5		余量	轧制或挤制材
	ZnCu1		0.8~1.2		余量	可作 H68、H70 黄铜代用品
	ZnCu0.3		0.2~0.4		余量	带材,锁外壳
锌铝合金	ZnAl15	14.0~16.0		0.02~0.04	余量	挤制材,轴承
	ZnAl10—5	9.0~11.0	4.5~5.5		余量	挤制材,压床模具
	ZnAl10—1	9.0~11.0	0.6~1.0	0.02~0.05	余量	挤制材,压床模具
	ZnAl4—1	3.7~4.3	0.6~1.0	0.02~0.05	余量	轧制或挤制材,可作 H59 黄铜代用品,模具
	ZnAl0.2—4	0.02~0.25	3.5~4.5		余量	轧制或挤制材,可制造要求尺寸稳定的锌合金零件

7. 铸造轴承合金化学成分(表 4-53)

表 4-53 锡基和铅基铸造轴承合金化学成分和用途

代 号	主要成分(质量分数)(%)						杂质(质量分数)(%)(不大于)							用 途 举 例
	Sb	Cu	Pb	Sn	Cd	As	Fe	Zn	Bi	As	Al	Pb	总和	
1. 锡锑轴承合金														
ZChSnSb 12—4—10 (ZChSn1)	11.0 ~ 13.0	2.5 ~ 5.0	9.0 ~ 11.0	余量			0.1	0.01	0.08	0.1	0.01		0.55	一般机器的主轴衬,但不适于高温部分
ZChSnSb 11—6 (ZChSn2)	10.0 ~ 12.0	5.5 ~ 6.5		余量			0.1	0.01	0.08	0.1	0.01	0.35	0.55	1470kW (2000 马力)以上的高速蒸汽机和 367.5kW (500 马力)的涡轮增压机,涡轮泵及高速内燃机轴承
ZChSnSb 8—4 (ZChSn3)	7.0 ~ 8.0	3.0 ~ 4.0		余量			0.1	0.01	0.08	0.1	0.01	0.35	0.55	一般大机器轴承及轴衬、高速高载荷汽车发动机薄壁双金属轴承
ZChSnSb 4—4 (ZChSn4)	4.0 ~ 5.0	4.0 ~ 5.0		余量			0.1	0.01	0.08	0.1	0.01	0.35	0.50	适用于涡轮内燃机高速轴承及轴衬
2. 铅锑轴承合金														
ZChPbSn 10—16—2 (ZChPb1)	15.0 ~ 17.0	1.5 ~ 2.0	余量	15.0 ~ 17.0			0.1	0.15	0.1	0.3			0.6	110.25 ~ 882kW (150 ~ 1200 马力)蒸汽涡轮机, 150 ~ 750kW 电动机和小于 1470kW (2000 马力)的起重机和重载荷的推力轴承
ZChPbSn 15—5—3 (ZChPb2)	14.0 ~ 16.0	2.5 ~ 3.0	余量	5.0 ~ 6.0	1.75 ~ 2.25	0.6 ~ 1.0	0.1	0.15	0.1				0.4	船舶机械、小于 250kW 电动机、抽水机轴承
ZChPbSb 15—10 (ZChPb3)	14.0 ~ 16.0		余量	9.0 ~ 11.0			0.1		0.1	0.2	0.005	(Cu) 0.5 ^①	0.5	中等压力的机械、也适用于高温轴承
ZChPbSb 15—5 (ZChPb4)	14.0 ~ 15.5	0.5 ~ 1.0	余量	4.0 ~ 5.5			0.1	0.15	0.1	0.2	0.01		0.75	低速、轻压力机械轴承
ZChPbSn 10—6 (ZChPb5)	9.0 ~ 11.0		余量	5.0 ~ 7.0			0.1	0.15	0.1	0.25	0.01	(Cu) 0.5 ^①	0.75	重载荷,耐蚀,耐磨用轴承

① 不计入杂质总和之内。

8. 铅合金化学成分(表 4-54 ~ 表 4-57)

表 4-54 铅锑合金化学成分和用途

代 号	主要成分		杂质总和 (不大于)	产品种类	用 途 举 例
	Pb	Sb			
PbSb0.5	余量	0.3 ~ 0.8	0.15	管、棒、线、 板、带、箔	化肥、化学纤维、农药、造船、电气等设备中作耐酸、耐蚀和防护材料
PbSb2	余量	1.5 ~ 2.5	0.2		
PbSb4	余量	3.5 ~ 4.5	0.2		
PbSb6	余量	5.0 ~ 7.0	0.3		
PbSb8	余量	7.2 ~ 9.2	0.3		
PbSb12	余量	10.0 ~ 14.0	0.3	管、棒、线	

注:成分均指质量百分数。

表 4-55 硬铅化学成分和用途

代 号	主 要 成 分				杂质总和 不大于	产 品 种 类	用途举例
	Sb	Cu	Sn	Pb			
PbSb4—0.2—0.5	3.5 ~ 4.5	0.05 ~ 0.2	0.05 ~ 0.5	余量	0.30	管、棒、板、带	化学纤维、 设备中耐酸、 耐蚀材料
PbSb6—0.2—0.5	5.5 ~ 6.5	0.05 ~ 0.2	0.05 ~ 0.5	余量	0.30	管、棒、板、带	
PbSb8—0.2—0.5	7.5 ~ 8.5	0.05 ~ 0.2	0.05 ~ 0.5	余量	0.30	管、棒、板、带及铸件	
PbSb10—0.2—0.5	9.5 ~ 10.5	0.05 ~ 0.2	0.05 ~ 0.5	余量	0.30	铸 件	

注:成分均指质量百分数。

表 4-56 特硬铅化学成分

代 号	主 要 成 分 %						杂质总和% (不大于)
	Sb	Cu	Ag	Te	Se	Pb	
PbCu0.5—0.1	—	0.1 ~ 0.5	0.01 ~ 0.1	0.04 ~ 0.1	0.01 ~ 0.05	余量	0.3
PbCu0.5—0.2	—	0.1 ~ 0.5	0.01 ~ 0.2	0.04 ~ 0.1	0.01 ~ 0.05	余量	0.3
PbSb2—0.1—0.5	1.5 ~ 2.5	0.05 ~ 0.2	0.01 ~ 0.5	0.04 ~ 0.1	0.01 ~ 0.05	余量	0.3
PbSb4—0.1—0.5	3.5 ~ 4.5	0.05 ~ 0.2	0.01 ~ 0.5	0.04 ~ 0.1	0.01 ~ 0.05	余量	0.3
PbSb6—0.1—0.5	5.5 ~ 6.5	0.05 ~ 0.2	0.01 ~ 0.5	0.04 ~ 0.1	0.01 ~ 0.05	余量	0.3
PbSb8—0.1—0.5	7.5 ~ 8.5	0.05 ~ 0.2	0.01 ~ 0.5	0.04 ~ 0.1	0.01 ~ 0.05	余量	0.3

表 4-57 易熔合金熔点和化学成分

熔点/℃	共晶型合金化学成分					熔点/℃	非共晶型合金化学成分			
	Bi	Pb	Sn	Cd	In		Bi	Pb	Sn	Cd
248		82.50		17.50		176 ~ 145	12.60	47.50	39.90	
183		38.14	61.86			152 ~ 120	21.00	42.00	37.00	
143		30.60	51.20	18.20		143 ~ 95	33.33	33.34	33.33	
138	58.00		42.00			139 ~ 132	5.00	32.00	45.00	18.00
124	55.50	44.50				114 ~ 95	59.40	14.80	25.80	
95	52.00	32.00	16.00			104 ~ 95	56.00	22.00	22.00	
91.5	51.65	40.20		8.15		92 ~ 83	52.00	31.70	15.30	1.00
70	50.00	26.70	13.30	10.00		90 ~ 70	42.50	37.70	11.30	8.50
58	49.40	18.00	11.60		21.00					
46.7	44.70	22.60	8.30	5.30	19.10					

注:成分均指质量百分数。

4.6 功能合金的化学成分(表 4-58 ~ 表 4-60)

表 4-58 磁性合金化学成分表

电 磁 纯 铁										
牌 号	化学成分(质量分数)(%)									
	C	Si	Mn	P	S	Al	Ni	Cr	Cu	Fe
DT3 DT3A	≤0.04	≤0.20	≤0.30	≤0.02	≤0.02	≤0.50	≤0.20	≤0.10	≤0.20	
DT4 DT4A DT4E DT4C	≤0.025	≤0.20	≤0.30	≤0.020	≤0.020	≤0.15 ~ 0.50	≤0.20	≤0.10	≤0.20	

电 工 用 钢

类 别	牌 号	化学成分(质量分数)(%)									
		C	Si	Mn	P	S	Al	N	余 量		
低硅 钢	DR530—50 DR400—50	≤0.09	2.0 ~ 2.8	0.15 ~ 0.35	≤0.05	≤0.035					
	DR440—50 DR360—50 DR320—35 DR225—35	≤0.08 ≤0.08 ≤0.07 ≤0.06	3.0 ~ 3.9 3.9 ~ 4.5 4.3 ~ 4.7 4.1 ~ 4.55	≤0.25 ≤0.20 ≤0.15 ≤0.15	≤0.03 ≤0.03 ≤0.025 ≤0.015	≤0.02 ≤0.02 ≤0.015 ≤0.005					
无 取 向	DW270—35 DW315—50 DW310—35 DW360—50 DW360—35 DW400—50	≤0.0028	≤3.0	≤0.50	≤0.02	≤0.015	≤0.80		≤0.0080		

(续)

电 工 用 钢

类别	牌 号	化学成分(质量分数)(%)							Fe
		C	Si	Mn	P	S	Al	N	
无 取 向	DW435—35 DW465—50	≤0.0028	2.50~1.50	≤0.50	≤0.02	≤0.015	≤0.80	≤0.008	余 量
	DW500—35 DW540—50 DW550—35 DW620—50	≤0.0028	1.80~1.0	≤0.50	≤0.02	≤0.015	≤0.80	≤0.008	
	DW800—50 DW1050—50 DW1300—50 DW1550—50	≤0.0028	≤0.20	≤0.50	≤0.02	≤0.015	≤0.80	≤0.008	
	DQ147—30 DQ151—35 DQ162—30 DQ166—35 DQ196—30 DQ200—35 DQ122C—30 DQ126C—35 DQ133C—30 DQ137C—35	≤0.0031	≤3.0	≤0.12	≤0.02	≤0.015	≤0.010	≤0.008	

(续)

铁钴钒软磁合金

序 号	牌 号	化学成分(质量分数)(%)														
		C	P	S	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	Co	Nb	Ti	Al	V	Fe
33	1J22	≤0.04	≤0.020	≤0.020	≤0.30	≤0.30	≤0.50			≤0.20	49.0~51.0				0.80~1.80	余量

铸造铝镍钴系永磁合金

序号	牌号	C	P	S	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	Co	Nb	Ti	Al	V	Fe
34	LN9						≤24.0			≤3.0				≤13.0		余量
35	LN10						≤26.0			≤3.0				≤13.0		余量
36	LNG12						≤21.0			≤6.0	≤12.0			≤10.0		余量
37	LNG16						≤20.0			≤4.0	≤15.0		≤0.5	≤9.5		余量
38	LNC34			≤0.2		≤0.8	≤14.7			≤2.4	≤19.0		≤0.3	≤7.8		余量
39	LNG37						≤14.0			≤3.0	≤24.0			≤8.0		余量
40	LNGT32						≤14.5			≤4.0	≤34.0		≤5.0	≤6.8		余量
41	LNGT38						≤14.5			≤4.0	≤34.0		≤5.0	≤6.8		余量
42	LNGT60						≤14.5			≤3.2	≤34.0		≤5.0	≤6.8		余量
43	LNGT72			≤0.2			≤14.5			≤3.2	≤34.0	≤1.0	≤5.0	≤6.8		余量
44	LNGT36J			≤0.2			≤14.0			≤3.5	≤38.0		≤8.0	≤7.5		余量

变形永磁合金

序 号	牌 号	化 学 成 分 (质 量 分 数) (%)												
		P	S	Ni	C	Cr	W	Co	Mo	Mn	Si	V	Ti	Fe
45	2J63	≤0.030	≤0.020	≤0.30	0.95 ~ 1.10	2.80 ~ 3.60				0.20 ~ 0.40	0.17 ~ 0.40			余 量
46	2J64	≤0.030	≤0.020	≤0.30	0.68 ~ 0.78	0.30 ~ 0.50	5.20 ~ 6.20			0.20 ~ 0.40	0.17 ~ 0.40			
47	2J65	≤0.030	≤0.020	≤0.60	0.90 ~ 1.05	5.50 ~ 6.50	5.20 ~ 6.20	5.50 ~ 6.50		0.20 ~ 0.40	0.17 ~ 0.40			
48	2J67	≤0.025	≤0.025		≤0.03		5.20 ~ 6.20	11.0 ~ 13.0	16.5 ~ 17.5	0.10 ~ 0.50	0.30			
49	2J31	≤0.025	≤0.020	≤0.70	≤0.12			51.0 ~ 53.0		≤0.70	≤0.70	10.8 ~ 11.7		
50	2J32	≤0.025	≤0.020	≤0.70	≤0.12			51.0 ~ 53.0		≤0.70	≤0.70	11.8 ~ 12.7		
51	2J33	≤0.025	≤0.020	≤0.70	≤0.12			51.0 ~ 53.0		≤0.70	≤0.70	12.8 ~ 13.8		
52	2J83	≤0.020	≤0.030		≤0.030	26.0 ~ 27.5		19.5 ~ 21.0		≤0.20	0.80 ~ 1.10			
53	2J84	≤0.020	≤0.030		≤0.030	25.5 ~ 27.0		14.5 ~ 16.0	3.00 ~ 3.50	≤0.20			0.50 ~ 0.80	
54	2J85	≤0.020	≤0.030		≤0.030	23.5 ~ 25.0		11.5 ~ 13.0		≤0.20	0.80 ~ 1.10			

(续)

磁 滞 合 金

	2J4	≤0.025	≤0.020	5.30~6.70	≤0.12			44~46		≤0.70	≤0.70	3.50~4.50	
55	2J4	≤0.025	≤0.020	5.30~6.70	≤0.12			44~46		≤0.70	≤0.70	3.50~4.50	
56	2J7	≤0.025	≤0.020	≤0.70	≤0.12			51~53		≤0.70	≤0.70	6.50~7.50	
57	2J9	≤0.025	≤0.020	≤0.70	≤0.12			51~53		≤0.70	≤0.70	8.50~9.50	
58	2J10	≤0.025	≤0.020	≤0.70	≤0.12			51~53		≤0.70	≤0.70	9.50~10.50	
59	2J11	≤0.025	≤0.020	≤0.70	≤0.12			51~53		≤0.70	≤0.70	10.5~11.5	
60	2J12	≤0.025	≤0.020	≤0.70	≤0.12			51~53		≤0.70	≤0.70	11.5~12.5	
61	2J51	≤0.030	≤0.030		≤0.03		14.0~15.0	11.0~13.0		≤0.70	≤0.50		
62	2J52	≤0.030	≤0.030		≤0.03		10.0~11.0	15.0~17.0		≤0.70	≤0.50		
63	2J53	≤0.030	≤0.030	3.00~4.00	≤0.08				5.00~6.00	≤0.70	≤0.50		
64	2J21	≤0.025	≤0.025		≤0.03			11.0~13.0	10.5~11.5	11.5~12.5	≤0.30		
65	2J23	≤0.025	≤0.025		≤0.03			11.0~13.0	12.5~13.5	0.10~0.50	≤0.30		
66	2J25	≤0.025	≤0.025		≤0.03			11.0~13.0	14.5~15.5	0.10~0.50	≤0.30		
67	2J27	≤0.025	≤0.025		≤0.03			11.0~13.0	16.5~17.5	0.10~0.50	≤0.30		

余 量

稀 土 永 磁 合 金

序 号	牌 号	化学成分(质量分数)(%)										
		Sm	Pr	Nd	Ce	SmHRE	Co	Cu	Fe	Zr	B	Al
1	SmCo5	33 ~ 36					64 ~ 67					
2	(SmPr)Co5	6 ~ 10					64 ~ 67					
3	Ce(CoCuFe)5				30 ~ 33		45 ~ 50	9 ~ 12	9 ~ 11			
4	(SmHRE)Co5		22 ~ 26			33 ~ 36	64 ~ 67					
5	Sm2(CoCuFeZr)17	22 ~ 28					余	3 ~ 5	14 ~ 24	1.5 ~ 3.5		
6	Sm(CoCuFe)7	24 ~ 32						6 ~ 15	2 ~ 10			
7	(SmHRE)2(CoCuFeZr)17					22 ~ 28	量	3 ~ 5	14 ~ 24	1.5 ~ 3.5		
8	Nd-Fe-B			33 ~ 35					65 ~ 67		0.9 ~ 1.1	0.5 ~ 1.0

表 4-59 膨胀合金化学成分表

序 号	牌 号	化学成分(质量分数)(%)																	
		C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Ti	Al	Co	W	Ce	Cu	Mg	Zr	Fe	
1	4J36	≤0.05	0.2~0.6	≤0.2	≤0.02	≤0.02	35.0~37.0								0.4~0.8				
2	4J32	≤0.05	0.2~0.6	≤0.2	≤0.02	≤0.02	31.5~33.0					3.20~4.20							
3	4J58	≤0.03	≤0.60	≤0.25	≤0.02	≤0.02	57.5~58.5												
4	4J42	≤0.05	≤0.60	≤0.30	≤0.02	≤0.02	41.5~42.5												
5	4J45	≤0.05	≤0.60	≤0.30	≤0.02	≤0.02	44.5~45.5												
6	4J50	≤0.05	≤0.60	≤0.30	≤0.02	≤0.02	49.5~50.5												
7	4J52	≤0.05	≤0.60	≤0.30	≤0.02	≤0.02	51.5~52.5												
8	4J54	≤0.05	≤0.60	≤0.30	≤0.02	≤0.02	53.5~54.5												
9	4J29	≤0.03	≤0.50	≤0.30	≤0.02	≤0.02	28.5~29.5			≤0.10	≤0.10	16.8~17.8				≤0.10	≤0.10		
10	4J33	≤0.05	≤0.50	≤0.30	≤0.02	≤0.02	32.1~33.6					14.0~15.2							
11	4J34	≤0.05	≤0.50	≤0.30	≤0.02	≤0.02	28.5~29.5					19.5~20.5							
12	4J6	≤0.05	≤0.40	≤0.30	≤0.02	≤0.02	41.5~42.5	5.50~6.30											
13	4J47	≤0.05	≤0.40	≤0.30	≤0.02	≤0.02	46.8~47.8	0.80~1.40											
14	4J49	≤0.05	≤0.40	≤0.30	≤0.02	≤0.02	46.0~48.0	5.00~6.00							≤1.5	B≤0.030			
15	4J78	≤0.05	≤0.40	≤0.30	≤0.02	≤0.02	余量		20.0~22.0										
化学成分(质量分数)(%)																			
序 号	牌 号	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Ti	Al	Mo	Cu	Zr	Co	Nb	Ge	V	Ca	Fe
16	Ni43CrTiMoCu	≤0.03	0.4~0.6	≤0.5	≤0.02	≤0.02	42.5~43.5	4.6~5.0	2.4~3.0	0.5~0.8	1.5~1.9	0.1~0.4							
17	Ni43CrTiZrGe	≤0.03	0.4~0.6	0.3~0.6	≤0.02	≤0.02	43.0~43.7	4.8~5.1	2.8~3.1	0.4~0.6	0.3~0.5		0.8~1.2			0.05~0.15		≤0.01	
18	Ni41CrTiMo	≤0.03	≤0.60	≤0.40	≤0.02	≤0.02	41.1~41.9	4.1~4.8	2.0~2.4	0.4~0.6	1.0~1.3	≤0.10	0.04~0.12						

表 4-60 弹性合金化学成分表

序 号	牌 号	化学成分(质量分数)(%)													
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Al	Co	W	Ce	Fe
弱磁性耐腐蚀高弹性合金															
1	3J1	≤0.05	≤1.00	≤0.08	≤0.02	≤0.02	11.5~ 13.0	34.5~ 36.5		2.70~ 3.20	1.00~ 1.80				余
2	3J2	≤0.05	0.80~ 1.20	≤0.50	≤0.01	≤0.01	12.5~ 13.5	35.0~ 37.0	4.0~ 6.0	2.70~ 3.20	1.00~ 1.30				量
3	3J3	≤0.05	0.80~ 1.20	≤0.50	≤0.01	≤0.01	12.0~ 13.0	35.0~ 37.0	7.5~ 8.5	2.70~ 3.20	1.00~ 1.30				量
高硬度高强度无磁耐腐蚀高弹性合金															
4	3J21	0.07~ 0.12	1.70~ 2.30	≤0.60	≤0.010	≤0.010	19.0~ 21.0	14.0~ 16.0	6.50~ 7.50			39.0~ 41.0		0.10~ 0.15	余量
5	3J22	0.08~ 0.15	1.80~ 2.20	≤0.50	≤0.010	≤0.010	18.0~ 20.0	15.0~ 17.0	3.00~ 4.00			39.0~ 41.0	4.0~ 5.0		余量
6	3J23	0.08~ 0.15	1.80~ 2.20	≤0.50	≤0.010	≤0.010	18.0~ 20.0	15.0~ 17.0	3.00~ 4.00			39.0~ 41.0	4.0~ 5.0	0.02~ 0.10	余量
7	3YC11						15.0~ 20.0	余量	3.00~ 5.00	≤1.50	0.50~ 0.80	40.0~ 45.0	8.0~ 11.0	≤0.10	
8	3YC15	0.15~ 0.17	1.50~ 2.20	≤0.30	≤0.080	≤0.080	19.0~ 21.0	15.0~ 17.0			0.40~ 0.60	余量	16.0~ 18.0	≤0.10	
9	3J40	≤0.03	≤0.10	≤0.20	≤0.010	≤0.010	39.0~ 41.0	余量			3.30~ 3.50			0.10~ 0.20	≤0.50
高强度高弹性合金															
10	0Cr17Ni7Al	≤0.09	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	1.60~ 1.80	6.50~ 7.75			0.75~ 1.50		Cu≤0.50		余
11	0Cr15Ni7Mo2Al	≤0.09	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	14.0~ 16.0	6.50~ 7.50	2.00~ 3.00		0.75~ 1.50				量
12	3J33	≤0.03	≤0.10	≤0.10	≤0.030	≤0.030		18.0~ 19.0	4.5~ 5.5	0.6~ 1.0	≤0.15	8.5~ 9.5		≤0.003	

(续)

序 号	牌 号	化学成分(质量分数)(%)															
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Al	Co	Nb	Zr	Cu	Be	Fe
无磁耐蚀高温高弹性合金																	
13	Ni40Cr20Co20MoZr	≤0.03	≤1.0	≤0.35			39.0~ 41.0	19.0~ 21.0	6.0~ 7.5	2.5~ 3.0	1.0~ 1.5	19.0~ 21.0		0.05~ 0.1	1.7~ 2.1		余量
高导电高弹性合金																	
14	3J31	≤0.03	≤0.03	≤0.05	≤0.01	≤0.01	余				≤0.1				≤0.1	1.90~ 2.20	≤0.30
15	3J32	≤0.03	≤0.03	≤0.05	≤0.01	≤0.01	量			0.4~ 0.6	≤0.1				≤0.1	1.90~ 2.20	≤0.30
16	Co67NiNb	≤0.05	0.1~ 0.3	0.1~ 0.3			27.0~ 29.0			≤0.03		余量	4.80~ 5.20			B	≤0.003
弹 磁 合 金																	
17	Cr19Ni4SiV	≤0.02		2.2~ 2.7			3.5~ 4.5	18.0~ 20.0	0.95~ 1.35	1.2~ 1.7				V1.0~ 2.3	0.7~ 1.2		余
18	Ni43Co20MoCrTi	≤0.03		0.4~ 0.7			42.0~ 43.5	4.5~ 5.5	1.9~ 2.2	2.3~ 2.6	0.4~ 0.7	19.5~ 20.5	0.4~ 0.8			B	量
19	Ni43Co28MoCrTi	≤0.03		0.45~ 0.70			42.0~ 43.5	4.5~ 5.5	1.9~ 2.2	2.3~ 2.6	0.4~ 0.55	27.5~ 28.5	0.4~ 0.8				
定膨胀系数高弹性合金																	
20	Co30Ni20CrTiAl	≤0.05	≤0.5	≤0.5	≤0.02	≤0.02	19.0~ 21.0	5.0~ 5.5		2.9~ 3.1	0.7~ 1.0	29.0~ 31.0					余量
小频率温度系数恒弹性合金																	
21	3J53	≤0.05	≤0.80	≤0.80	≤0.020	≤0.020	41.5~ 43.0	5.20~ 5.80		2.30~ 2.70	0.50~ 0.80						余
22	3J58	≤0.05	≤0.80	≤0.80	≤0.020	≤0.020	43.0~ 43.6	5.20~ 5.60		2.30~ 2.70	0.50~ 0.80						量

4.7 各国特殊用途合金相似对照(表 4-61 ~ 表 4-63)

表 4-61 精密磁性合金各国相似牌号对照表

序号	中 国	俄罗斯	美 国	日 本	英 国	法 国	德 国
1	DT3	OM 型		SUYB2			RFe120
2	DT3A	OM 型		SUYB1			RFe120
3	DT4			SUYB2			RFe120
4	DT4A			SUYB1			RFe120
5	DT4E						RFe60
6	DT4C						RFe40
7	DR530—50	Э22					V230—50B
8	DR400—50	Э22					V230—50B
9	DR440—50	Э31		S18E			
10	DR360—50	Э41		S14E			V150—50B
11	DR320—35	Э41					
12	DR225—35	Э44					
13	DW270—35	Э42	M19				V135—50A
14	DW315—50						
15	DW310—35	Э41, Э3100	M22	S12	G315		V130—35A
16	DW360—35	Э32	M36	S14	G335		
17	DW360—50	Э41, Э100	M22	S12	G355		V150—50A
18	DW400—50	Э32	M36	S14	G400		V170—50A
19	DW540—50	Э22		S20	G500		V230—50A
20	DW620—50	Э21	M45	S23	G630		V260—50A
21	DW800—50	Э11	M47	S30	G800		V360—50A
22	DW1050—50			S40			
23	DW1300—50			S50			
24	DW1550—50			S60			
25	DQ147—30		M5	G10, Z10	30M5		VM97—30
26	DQ151—35			G10, Z10			
27	DQ162—30		M6	G11, Z11	30M6		
28	DQ166—35	Э 330A	M6	G11, Z11	35M6		VM111—36
29	DQ122G—30			Z8H			
30	DQ126G—35			Z8H			
31	DQ133G—30						
32	DQ137G—35			29H			
33	1J76	76HXД	Mumetal	PC			
34	1J77	77HXД		PC			
35	1J79	79HM	4-79Permalloy	PC			
36	1J80	80HΦC					
37	1J85	79HMA	Supermalloy	PCS			
38	1J86			6—81M			
39	1J72						
40	1J46	46H	45-Permalloy	PB			
41	1J50	50H	Hy-Ra49				
42	1J54	50HXC	PermalloyD				
43	1J66						
44	1J34	34HKMΠ	Mo-Permiver				
45	1J51	50HΠ	Deltamax	PE			
46	1J52						
47	1J65	65H	65-Permalloy				

(续)

序号	中 国	俄罗斯	美 国	日 本	英 国	法 国	德 国
48	1J67	65HM	Dynamax				
49	1J83	80HM					
50	1J403						
51	1J87			Fe-Ni-Nb-Mo			
52	1J88			Fe-Ni-Nb			
53	1J89			Fe-Ni-Nb-Mo-Ti			
54	1J90			Fe-Ni-Nb-Mo-Al			
55	1J91			Fe-Ni-Nb-Al			
56	1J30	30H	Thermo perm	MS-1			
57	1J31	31H		MS-2			
58	1J32						
59	1J33	33HЮ					
60	1J38	38H14X					
61	1J6						
62	1J12	Ю12	12Alfenol	Hypermal			
63	1J13	Ю13		Alfer			
64	1J16	Ю16		Alperm			Vacodur16
65	1J22	50KΦ	Hiperco50, Supermendur		Permendur		
66	LN9						
67	LN10	ЮНД4	AlNiCo3	YCM-4C			
68	LNC12						
69	LNG16	ЮНДК15					
70	LNG34	ЮНДК18C					
71	LNG37	ЮН14ДК24	AlNiCo5	YCM-18			
72	LNGT32	ЮНДК34T5					
73	LNGT38	ЮНДК35T5	AlNiCo8	YCM-88			
74	LNGT60						
75	LNGT72	ЮНДК35T56A	AlNiCo9	YCM-9B			
76	LNGT36J		AlNiCo8HC	YCM-8D			
77	2J63	EX3					
78	2J64	EB6					
79	2J65	EX5K5					
80	2J67	КОМОА					
81	2J31	52KΦB					
82	2J32	52KΦ6					
83	2J33	52KΦA					
84	2J83			YH1			
85	2J84			CK400			
86	2J85			CK500			
87	2J4		P6				
88	2J7	52KΦ7					
89	2J9	52KΦ9					
90	2J10		Vicalloy1				
91	2J11	52KΦB, 52KΦ11					
92	2J12	52KΦ6					
93	2J51	12KΦ14					
94	2J52	16KBM					
95	2J53	12ГН					

(续)

序号	中 国	俄罗斯	美 国	日 本	英 国	法 国	德 国
96	2J21	12KM12					
97	2J23	12KM14					
98	2J25	12M16					
99	2J27	KOMO					
100	SmCo5			Hicotex-20			
101	(SmPr)Co5			Hicotex-18			
102	Ce(CoCuFe)5			Rarent-H B			
103	(SmHRE)Co5						
104	Sm2(CoCuFeZr)17						
105	Nd-Fe-B						

表 4-62 精密弹性合金各国相似牌号对照表

序号	中 国	俄罗斯	美 国	日 本	英 国	法 国	德 国
1	3J1	ЭИ702,36HXTЮ					
2	3J2	ЭИ51,36HXTЮM5					
3	3J3	ЭИ52,36HXTЮM8					
4	3J21	40KXHM	Elgiloy	NAS604PH K. R. N		Phynox	
5	3J22	40KXHMB	Diaflex, Ekolloy				Nivaflex
6	3J40	ЭИ973,40XHЮBH					
7	3J33	H18K9M5T	AlMar300				
8	3J31	ЭИ996					Beryvac520
9	3J32		Nickel440		Beryico		
10	Co67NiNb	67KHБ5					
11	3J53	H41XT,42HXTЮ	Ni-Span C902	Sumispan—3, E1—3	Ni-Span C		Ni-Span C
12	3J58	H43XT,44HXTЮ		Sumispan—4, E1—4			
13	Ni33 ~ 39Co13 ~ 22NbTiAl		Incoloy903				
14	Ni43CoTiAlNb	43HKTЮ					
15	Nb-40Ti-5.5 Al	55BTЮ					
16	TiNi		Nitinol				

表 4-63 精密膨胀合金各国相似牌号对照表

序号	中 国	俄罗斯	美 国	日 本	英 国	法 国	德 国
1	4J36	36H,36H-BИ	Invar, Nilvar Unipsan36	不变钢 Catus LE	Invar, 36Ni Nilo36	Invar Standard Fe-Ni36	
2	4J32	32HK	Super-Invar	超不变钢			
3	4J58	58H-BИ				N58	
4	4J42	42H	Glass Sealling 42 Uniseal 42	D NSD	Nilo42 Invar42	N42 Fe-Ni42	Vacodil42 Nilo42

(续)

序号	中 国	俄罗斯	美 国	日 本	英 国	法 国	德 国
5	4J45	46H	Niromet46 Ferrovac46Ni		Nilo45		Vacodil46
6	4J50	50H	Fe-Ni50	NS—1	Nilo51	N50	Vavovit500
7	4J52	52H	Glass Sealling52	N52		N52	Vavovit520
		52H-BИ	Niloy 52				Fe-Ni52
8	4J54					N54	Vavovit540
							Fe-Ni54
9	4J29	29HK	Kovar, Rodar	KV—1	Nilok	DilverP0	Vacon 12
		29HK-BИ	Techalloy	KV—2	Telcaseal	Dilver P1	Silver 48
			Glasseall—29—17	KV—3			
10	4J33	33HK		KV—4			
		(Ni33Co17)		(Ni33Co11)			
11	4J34	31HK	Ceramvar				Vacon 20
		(Ni31Co20)					
		24HK	(Ni27Co25)				(Ni28Co20)
		(Ni25Co28)					
12	4J6		42Ni—6Cr	NRS—1			Vacovit426
			Carpenter426	VEF—426		ASV(426) Ni42Cr6 461	
13	4J47	47HX					
14	4J49	47HXP	Carpenter456			FeNi46Cr—5	Vacovit 465 485
15	4J78	75HM					

第5章 钢热处理基本数据

5.1 钢的过冷奥氏体等温转变图(表 5-1, 表图 5.1-1 ~ 表图 5.1-63)

表 5-1 常用钢奥氏体等温转变图

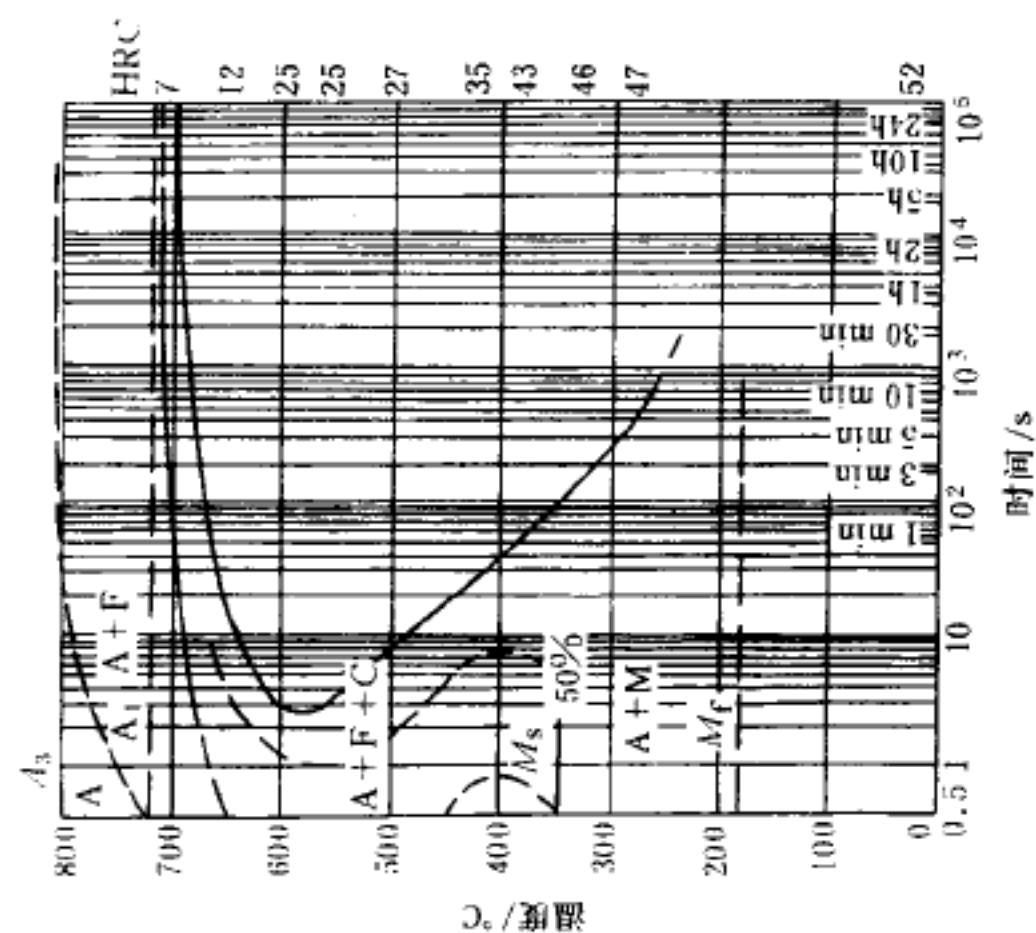
表图号	钢 号	化学成分(质量分数)(%)	状 态
表图 5.1-1	08 钢	C0.06, Mn0.43	奥氏体化温度 910℃, 晶粒度 7, A_1 730℃, M_s 480℃
表图 5.1-2	30 钢	C0.30, Si0.46	奥氏体化温度 840℃, 晶粒度 6~8, A_1 745℃
表图 5.1-3	35 钢	C0.35, Mn0.37	奥氏体化温度 840℃, A_1 720℃, A_3 800℃, M_s 350℃
表图 5.1-4	45 钢	C0.46, Si0.19, Mn0.8, Cr0.13	奥氏体化温度 850℃, A_{c1} 740℃, A_{c3} 805℃, M_s 345℃
表图 5.1-5	50 钢	C0.53, Si0.23, Mn0.32	奥氏体化温度 900℃, A_1 720℃, M_s 290℃
表图 5.1-6	55 钢	C0.55	奥氏体化温度 870℃, A_1 730℃, A_3 760℃, M_s 320℃
表图 5.1-7	65 钢	C0.64, Si0.22, Mn0.68	A_1 720℃, A_3 740℃, M_s 285℃
表图 5.1-8	16Mn 钢	C0.19, Si0.53, Mn1.38, Ti0.02	原态退火, 奥氏体化温度 910℃, 时间 20min, 晶粒度 8, M_s 386℃
表图 5.1-9	Y40Mn 钢	C0.51, Si0.25, Mn1.39, S0.257, P0.04	奥氏体化温度 850℃, 晶粒度 8, A_{c1} 731℃, A_{c3} 807℃, M_s 280℃
表图 5.1-10	14MnVTiRE 钢	C0.14, Si0.48, Mn1.52, V0.071, Ti0.12, RE0.016	原态正火, 奥氏体化温度 930℃, 时间 20min, 晶粒度 8, M_s 434℃
表图 5.1-11	20Mn2 钢	C0.20, Mn1.88, Cu0.11	奥氏体化温度 925℃, 晶粒度 7~8, A_1 695, A_3 820℃
表图 5.1-12	40Mn2 钢	C0.40, Si0.40, Mn2.06, Cr0.11, Ni0.05	A_1 695℃, A_3 770℃, M_s 300℃
表图 5.1-13	18MnMoNb 钢	C0.19, Si0.27, Mn1.30, P0.013, S0.008, Cr0.24, Ni0.25, Mo0.53, Nb0.04, Cu0.03	原态正火 + 回火, 奥氏体化温度 900℃, 时间 20min, 晶粒度 7~8, M_s 417℃
表图 5.1-14	40MnB 钢	C0.41, Si0.47, Mn1.08, S0.035, P0.026, B0.0034	奥氏体化温度 850℃, 时间 6min, A_{c1} 730℃, A_{c3} 780℃
表图 5.1-15	40MnBRE 钢	C0.38, Si0.25, Mn1.13, Cr0.03, Ni0.03, S0.004, P0.010, RE0.079, B0.0038, Cu0.04	奥氏体化温度 850℃, 时间 10min, A_{c1} 725℃, A_{c3} 805℃, M_s 340℃
表图 5.1-16	20Mn2B 与 20Mn2 钢	C0.21, Mn2.04, B0.0015	含 B, 奥氏体化温度 930℃, A_1 690℃, A_3 805℃, 晶粒度 6~8; 无 B 各项同含 B
表图 5.1-17	20Mn2B 与 20Mn2 钢(渗 C 后)	C0.40, Mn2.04, B0.0015	含 B 奥氏体化温度 930℃, 晶粒度 2~4(50%), 6~7(50%), A_1 690℃, A_3 780℃
表图 5.1-18	20Mn2TiB 钢	C0.20, Si0.32, Mn1.63, P0.014, S0.0015, Cr0.15, Ni0.12, Ti0.085, B0.0028	原态正火 + 高温回火, 奥氏体化温度 900℃, 时间 25min, 晶粒度 4~5, M_s 410℃

(续)

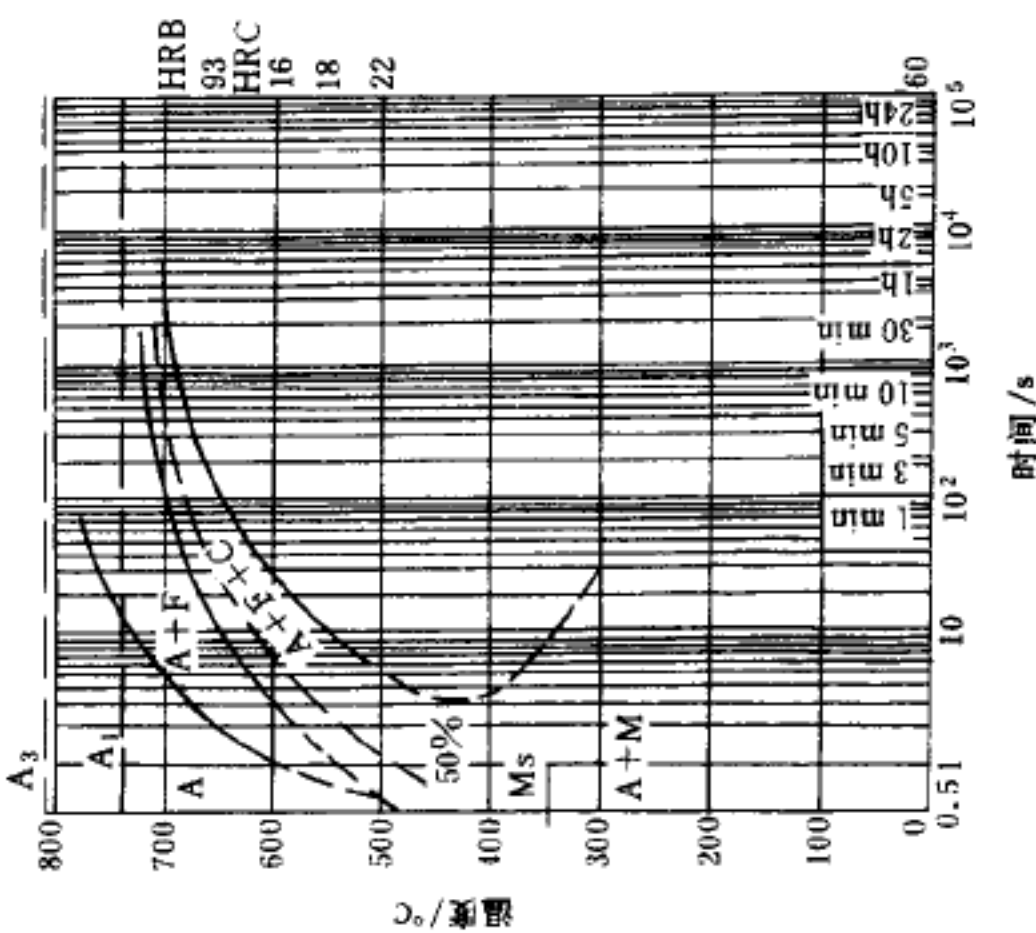
表图号	钢 号	化学成分(质量分数)(%)	状 态
表图 5.1-19	35SiMn 钢	C0.37, Si1.32, Mn1.30, P0.010, S0.003, Cr<0.005, Ni<0.005	原态退火, 奥氏体化温度 900℃, 时间 20min, 晶粒度 7~8, M_s 310℃
表图 5.1-20	20Cr 钢	C0.21, Si0.25, Mn0.62, P0.020, S0.009, Cr0.92, Ni0.13, Cu0.12	原态正火 + 高温回火, 奥氏体化温度 910℃, 时间 20min, 晶粒度 6~7, M_s 390℃
表图 5.1-21	40Cr 钢	C0.38, Si0.26, Mn0.74, Cr0.90, Ni0.26, Mo0.04, Cu0.17	奥氏体化温度 850℃, A_1 705℃, A_3 805℃, M_s 325℃
表图 5.1-22	20CrMo 钢	C0.18, Si0.21, Mn0.62, Cr0.81, Mo0.27	奥氏体化温度 870℃, A_1 755℃, A_3 840℃, M_s 380℃
表图 5.1-23	20CrMo 钢(渗 C 后)	C1.08, Si0.21, Mn0.62, Cr0.81, Mo0.27	奥氏体化温度 870℃, A_1 735℃, A_3 775℃, M_s 100℃
表图 5.1-24	35CrMo 钢	C0.35, Cr1.15, Mo0.25	奥氏体化温度 870℃, A_1 730℃, A_3 800℃, M_s 330℃
表图 5.1-25	45CrMo 钢	C0.41, Si0.23, Mn0.67, Cr1.01, Ni0.20, Mo0.23	奥氏体化温度 860℃, A_1 730℃, A_3 800℃, M_s 310℃
表图 5.1-26	25CrMoVA 钢	C0.23, Si0.30, Mn0.53, P0.018, Cr1.55, Ni0.03, Mo0.29, V0.21, Cu0.11	原态正火 + 回火, 奥氏体化温度 940℃, 时间 30min, M_s 365℃
表图 5.1-27	38CrMoAlA 钢	C0.379, Si0.42, Mn0.42, Cr1.38, Mo0.23, Al0.82	原态正火 + 回火, 奥氏体化温度 930℃, 时间 20min, M_s 380℃
表图 5.1-28	35CrMnSiA 钢	C0.35, Si1.18, Mn0.98, P0.019, S0.007, Cr1.27, Ni0.05, Cu0.09	原态正火 + 回火, 奥氏体化温度 880℃, 时间 20min, M_s 330℃
表图 5.1-29	20Cr2Mn2MoA 钢(渗 C 后)	C0.98, Si0.34, Mn1.48, P0.007, S0.007, Cr2.1, Mo0.31, Cu0.08, Al0.04	原态退火, 奥氏体化温度 900℃, 时间 30min, 晶粒度 8, M_s 120℃
表图 5.1-30	20CrMnTi 钢	C0.184, Si0.28, Mn0.98, P0.013, S0.013, Cr1.18, Ti1.17, Cu0.09	原态正火, 奥氏体化温度 880℃, 时间 25min, 晶粒度 7~8, M_s 374℃
表图 5.1-31	20CrMnTi 钢(渗 C 后)	C1.02, Si0.34, Mn0.96, P0.012, S0.005, Cr1.26, Ti0.12	原态球化退火, 奥氏体化温度 780℃, 时间 30min, 晶粒度 8, M_s 185℃
表图 5.1-32	20CrNi 钢	C0.20, Si0.15, Mn0.71, Cr0.80, Ni1.13, Mo0.05	奥氏体化温度 865℃, A_1 720℃, A_3 800℃, M_s 410℃
表图 5.1-33	20CrNi 钢(渗 C 后)	C0.96, Si0.26, Mn0.74, Cr0.81, Ni1.19, Mo0.09	奥氏体化温度 865℃, A_1 710℃, M_s 10℃
表图 5.1-34	40CrNi 钢	C0.38, Si0.21, Mn0.72, Cr0.50, Ni1.13	奥氏体化温度 845℃, A_1 707℃, A_3 754℃, M_s 340℃
表图 5.1-35	12CrNi3 钢	C0.13, Si0.34, Mn0.50, P0.013, S0.004, Cr0.76, Ni2.92	原态正火 + 回火, 奥氏体化温度 860℃, 时间 20min, M_s 409℃
表图 5.1-36	12CrNi3 钢(渗 C 后)	C1.0, Si0.12, Mn0.30, Cr0.90, Ni3.27	奥氏体化温度 860℃, A_1 680℃, M_s 100℃
表图 5.1-37	20Cr2Ni4A 钢	C0.17, Si0.31, Mn0.51, P0.021, S0.005, Cr1.57, Ni3.45, Mo0.25, Cu0.12	原态正火 + 高温回火, 奥氏体化温度 880℃, 时间 20min, M_s 395℃
表图 5.1-38	20Cr2Ni4 钢	C0.18, Cr1.68, Ni3.73	奥氏体化温度 900℃, A_1 705℃, A_3 770℃, M_s 330℃
表图 5.1-39	20Cr2Ni4 钢(渗 C 后)	C1.08, Cr1.68, Ni3.73	奥氏体化温度 900℃, A_1 705℃, A_3 770℃, M_s 120℃
表图 5.1-40	40CrNiMo 钢	C0.40, Si0.38, Mn0.69, P0.010, S0.008, Cr0.94, Ni1.95, Mo0.29	原态退火, 奥氏体化温度 845℃, 时间 15min, M_s 275℃

(续)

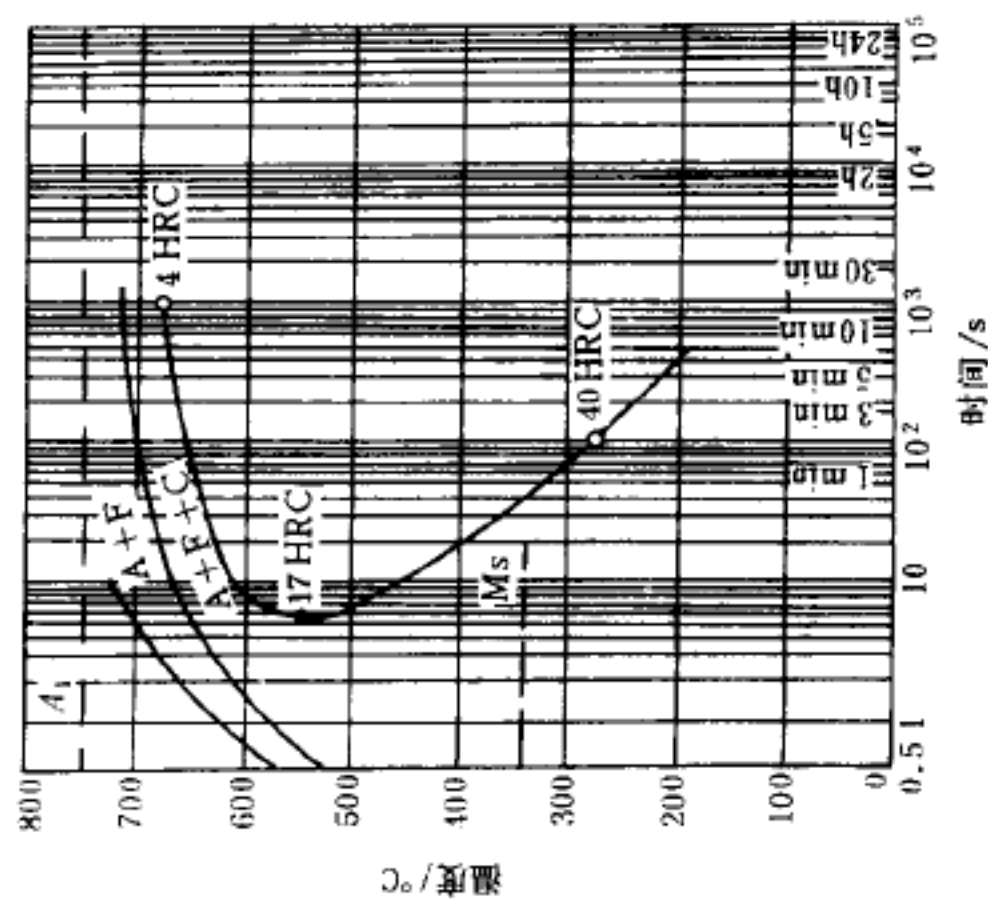
表图号	钢 号	化学成分(质量分数)(%)	状 态
表图 5.1-41	65Mn 钢	C0.64, Si0.18, Mn0.92, P0.017, S0.005, Cu0.16	原态退火, 奥氏体化温度 830℃, 时间 20min, 晶粒度 5, M_s 254℃
表图 5.1-42	60Si2Mn 钢	C0.62, Si2.0, Mn0.95, Cr0.15	奥氏体化温度 870℃, A_1 745℃, A_3 805℃
表图 5.1-43	55SiMnMoV 钢	C0.54, Si1.76, Mn0.65, P0.013, S0.008, Cr0.32, Ni0.06, Mo0.39, V0.27	原态退火, 奥氏体化温度 860℃, 时间 20min, 晶粒度 8, M_s 280℃
表图 5.1-44	轴 承 钢		
表图 5.1-45	GCr6 钢	C1.05, Si0.19, Mn0.32, Cr0.54	奥氏体化温度 820℃, A_1 727℃, A_{cm} 760℃, M_s 192℃
	GCr15 钢	C1.03, Si0.28, Mn0.25, P0.16, S0.007, Cr1.47, Ni0.04, Mo < 0.02, Cu0.05	原态球化退火, 奥氏体化温度 850℃, 时间 25min, 晶粒度 6~7, M_s 202℃
表图 5.1-46	GCr15SiMn 钢	C0.93, Si0.55, Mn1.10, Cr1.33	奥氏体化温度 825℃, A_1 730℃, M_s 205℃
	工 具 钢		
表图 5.1-47	T8 钢	C0.76, Si0.22, Mn0.29, Cr0.11, Ni0.07, Mo0.02, V0.02, Cu0.11	奥氏体化温度 810℃, A_1 720℃, A_3 740℃, M_s 245℃
表图 5.1-48	T10 钢	C1.03, Si0.17, Mn0.22, Cr0.07, Ni0.10, Mo0.01, Cu0.14	奥氏体化温度 790℃, A_1 717℃, A_3 736℃, M_s 175℃
表图 5.1-49	Cr 钢	C1.01, Si0.03, Mn0.50, Cr1.21	奥氏体化温度 815℃, A_1 750℃, M_s 205℃
表图 5.1-50	9Cr2 钢	C0.89, Si0.32, Mn0.30, Cr2.0, Ni0.13	奥氏体化温度 860℃, A_1 740℃, M_s 207℃
表图 5.1-51	Cr12 钢	C2.08, Si0.28, Mn0.39, Cr11.48, Ni0.31, Mo0.02, V0.04, Cu0.05	奥氏体化温度 970℃, A_1 768℃, A_3 797℃, M_s 184℃
表图 5.1-52	9Mn2V 钢	C0.94, Si0.19, Mn1.92, P0.017, S0.012, Cr0.05, Ni0.05, V0.18, Cu0.12	原态退火, 奥氏体化温度 800℃, 时间 30min, 晶粒度 7, M_s 160℃
表图 5.1-53	CrWMn 钢	C0.13, Si0.28, Mn0.97, Cr1.05, Ni0.13, W1.15, Cu0.25	奥氏体化温度 815℃, A_1 730℃, A_3 770℃, M_s 245℃
表图 5.1-54	5CrMnMo 钢	C0.58, Si0.40, Mn1.17, Cr0.76, Ni0.34, Mo0.21	奥氏体化温度 850℃, A_1 715℃, M_s 225℃
表图 5.1-55	3Cr2W8V 钢	C0.27, Si0.38, Mn0.26, Cr2.63, Ni0.23, W8.4, V0.45	A_1 815℃
表图 5.1-56	4Cr5MoVSi 钢	C0.37, Si1.05, Mn0.50, P0.009, S0.04, Cr5.10, Mo1.40, V0.53	原态退火, 奥氏体化温度 1000℃, 时间 20min, 晶粒度 7~8, M_s 310℃
表图 5.1-57	W18Cr4V 钢	C0.81, Si0.15, Mn0.33, Cr3.77, Ni0.12, Mo0.44, W18.25, V1.07	奥氏体化温度 1290℃, A_1 810℃, A_3 860℃, M_s 140℃
	不 锈 耐 热 钢		
表图 5.1-58	0Cr13 钢	C0.07, Si0.30, Mn0.21, Cr12.3, Ni0.09	奥氏体化温度 1100℃, A_1 800℃, A_3 905℃, M_s 370℃
表图 5.1-59	1Cr13 钢	C0.11, Si0.45, Mn0.49, Cr12.0, Ni0.13, Mo0.02, V0.02	奥氏体化温度 1000℃, A_1 820℃, A_3 950℃
表图 5.1-60	2Cr13 钢	C0.24, Si0.37, Mn0.27, Cr13.32, Ni0.32, Mo0.06	奥氏体化温度 960℃, A_1 820℃, M_s 320℃
表图 5.1-61	3Cr13 钢	C0.25, Si0.37, Mn0.29, Cr13.4, Ni0.13	奥氏体化温度 980℃, A_1 780℃, A_3 850℃, M_s 240℃
表图 5.1-62	Cr17 钢	C0.09, Si0.33, Mn0.40, Cr17.32, Ni0.34, N0.03	奥氏体化温度 1090℃, A_1 875℃, M_s 160℃
表图 5.1-63	Mn13 钢	C1.18, Si0.26, Mn12.28	奥氏体化温度 1050℃, $M_s \approx -200$ ℃
	高 锰 钢		



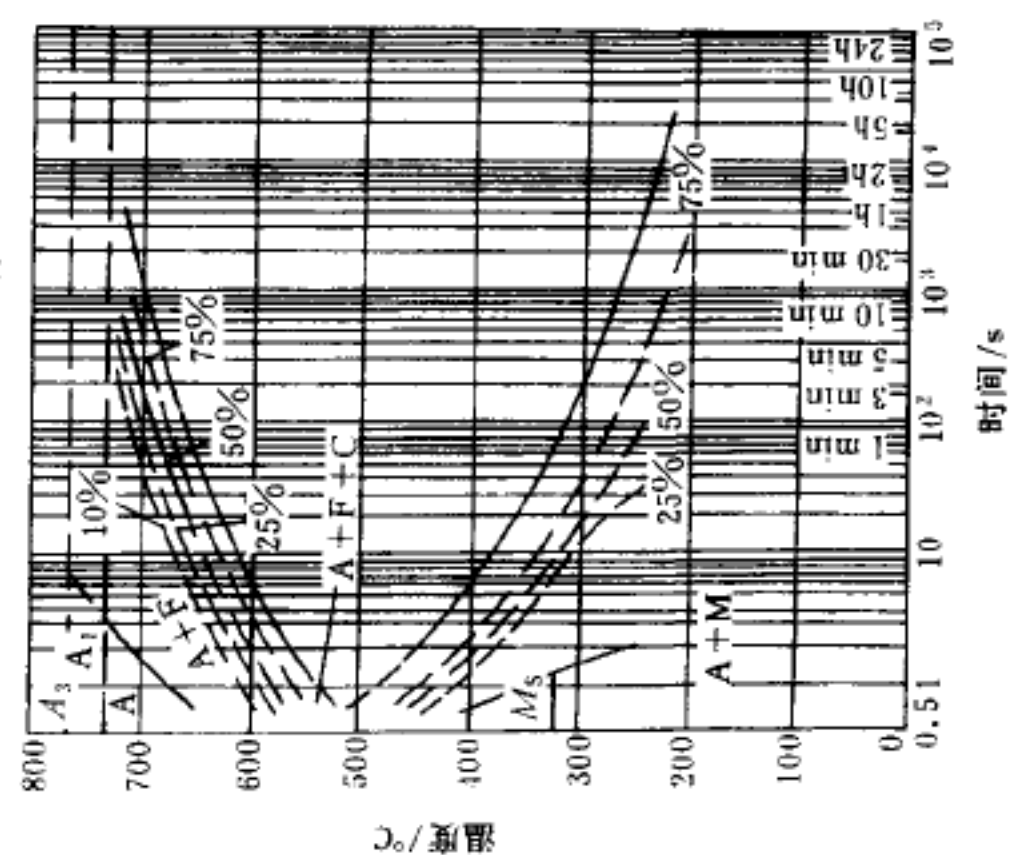
表图 5.1-1 08 钢



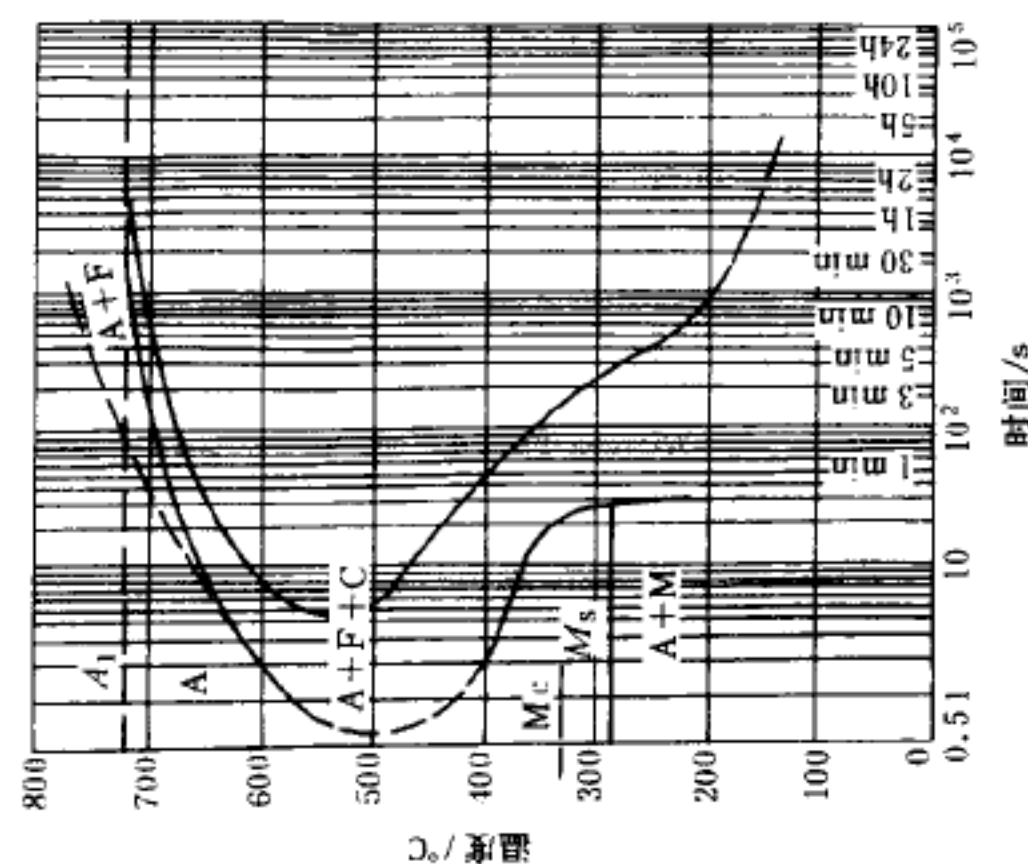
表图 5.1-2 30 钢



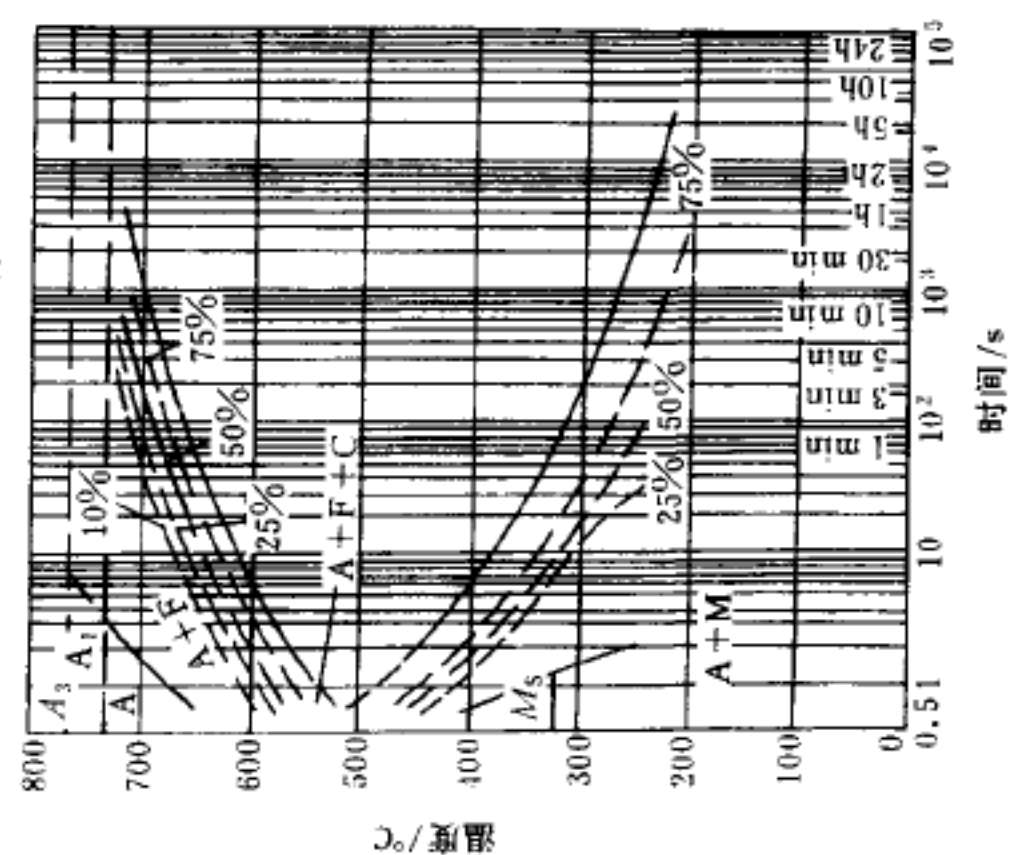
表图 5.1-3 35 钢



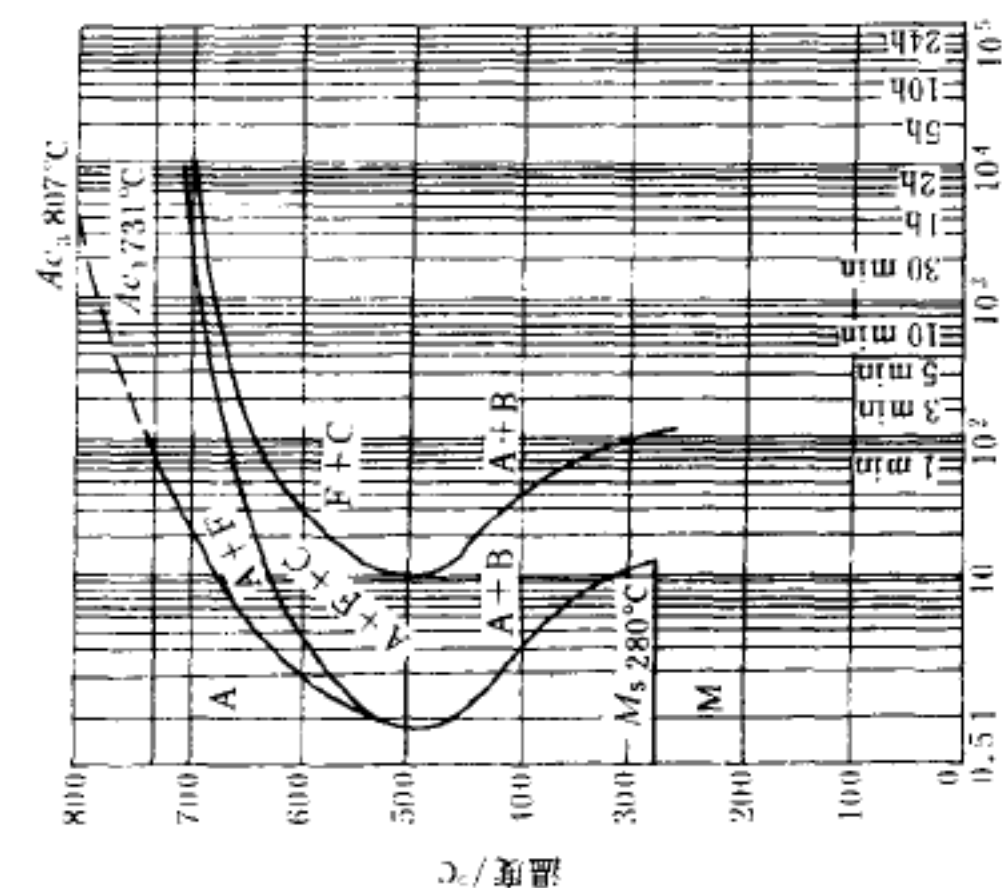
表图 5.1-4 45 钢



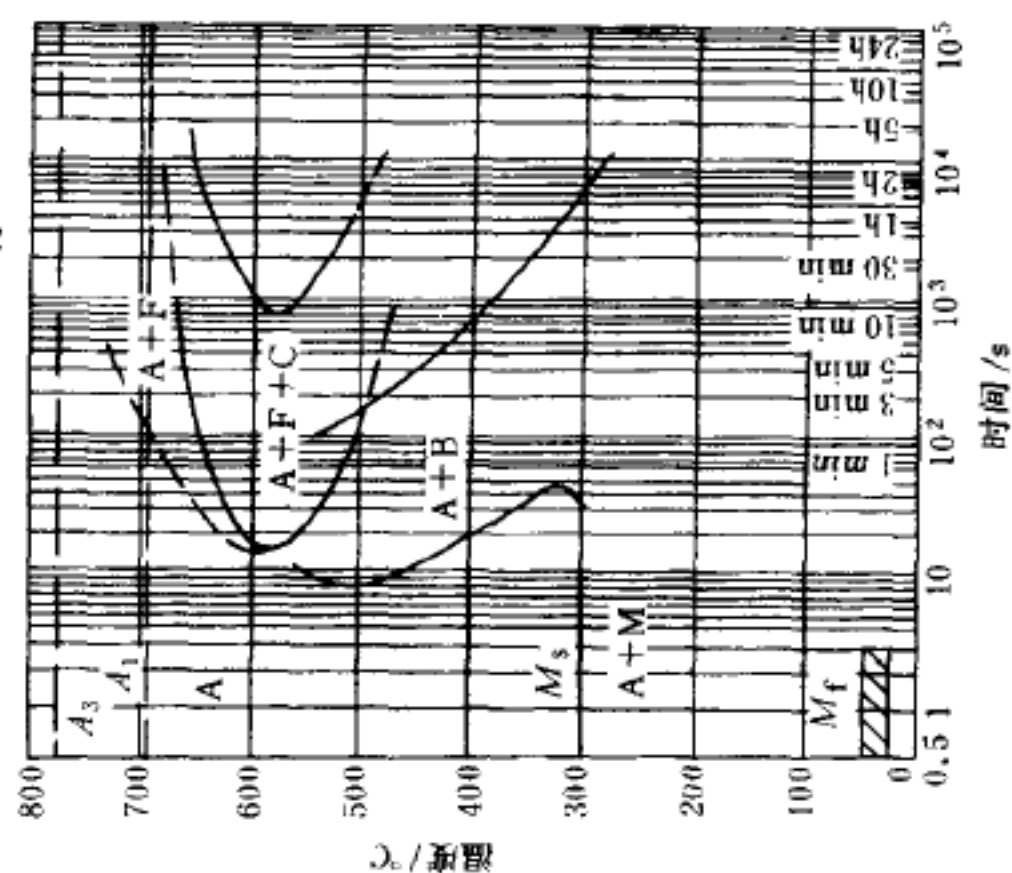
表图 5.1-5 50 钢



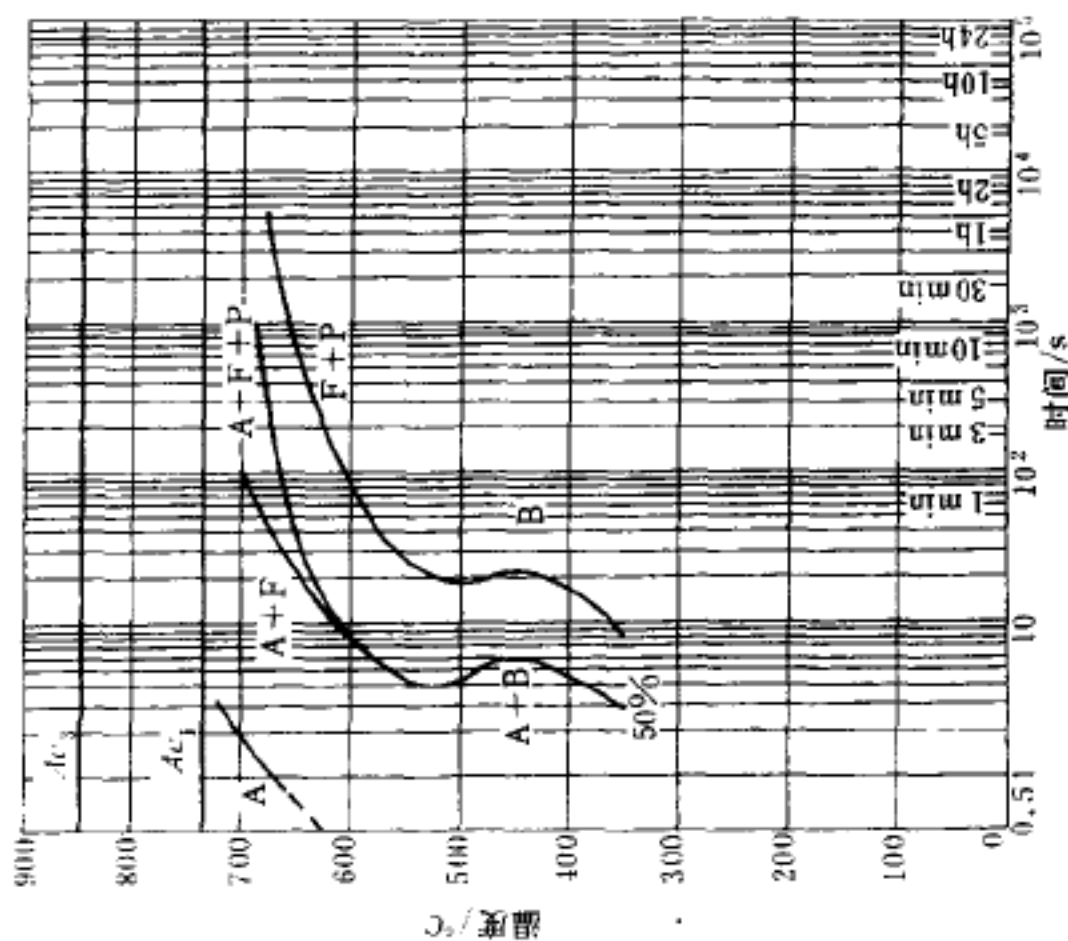
表图 5.1-6 55 钢



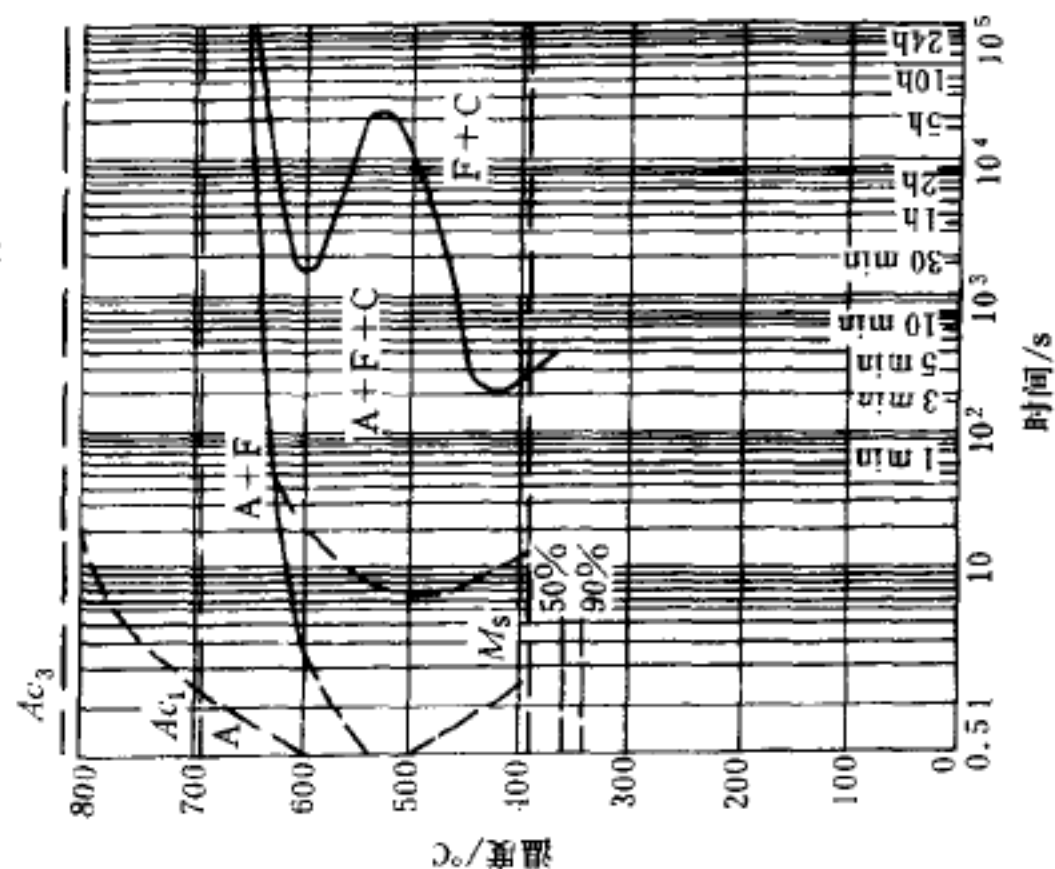
表图 5.1-9 Y40Mn 钢



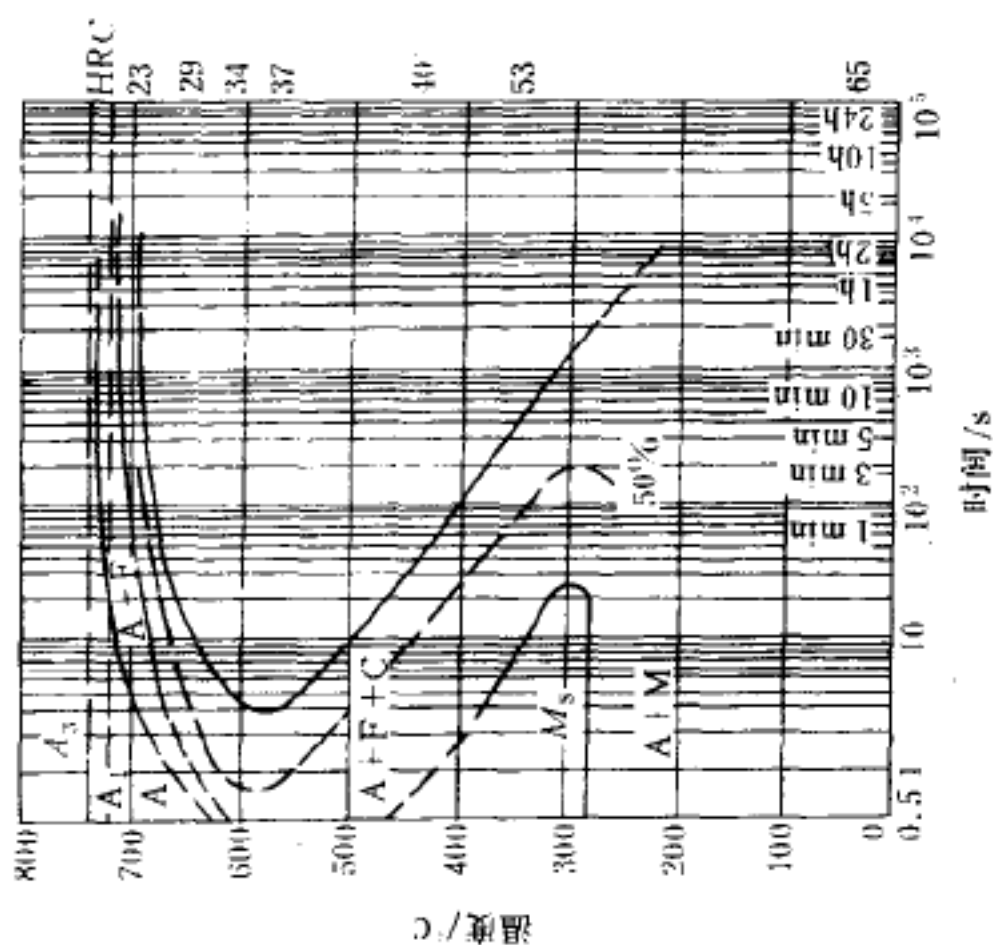
表图 5.1-12 40Mn2 钢



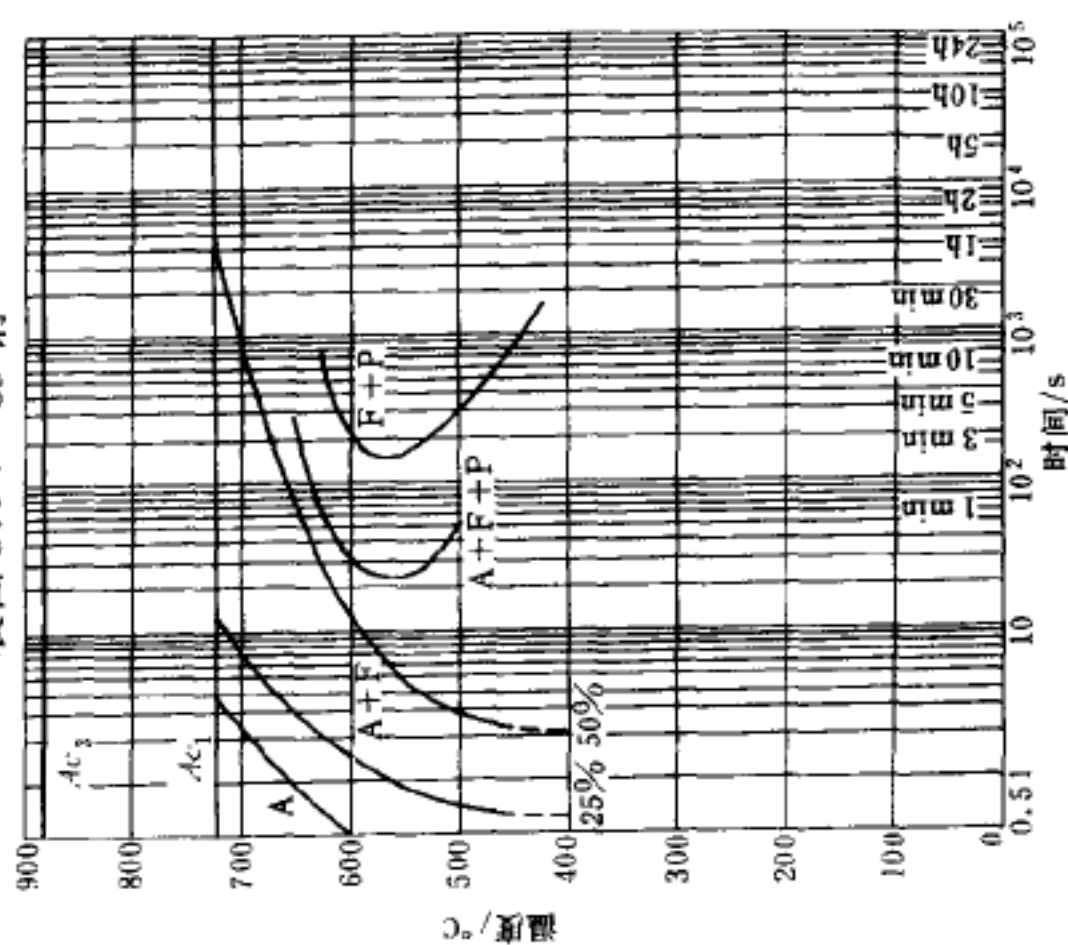
表图 5.1-8 16Mn 钢



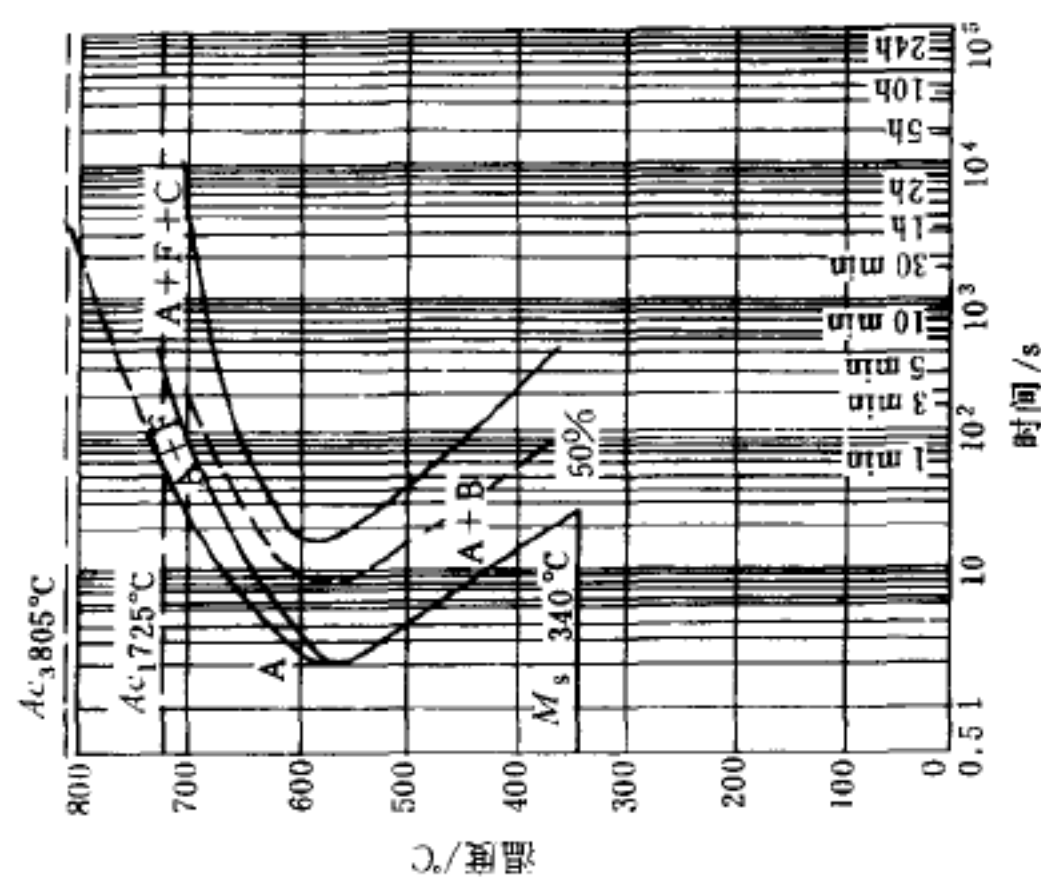
表图 5.1-11 20Mn2 钢



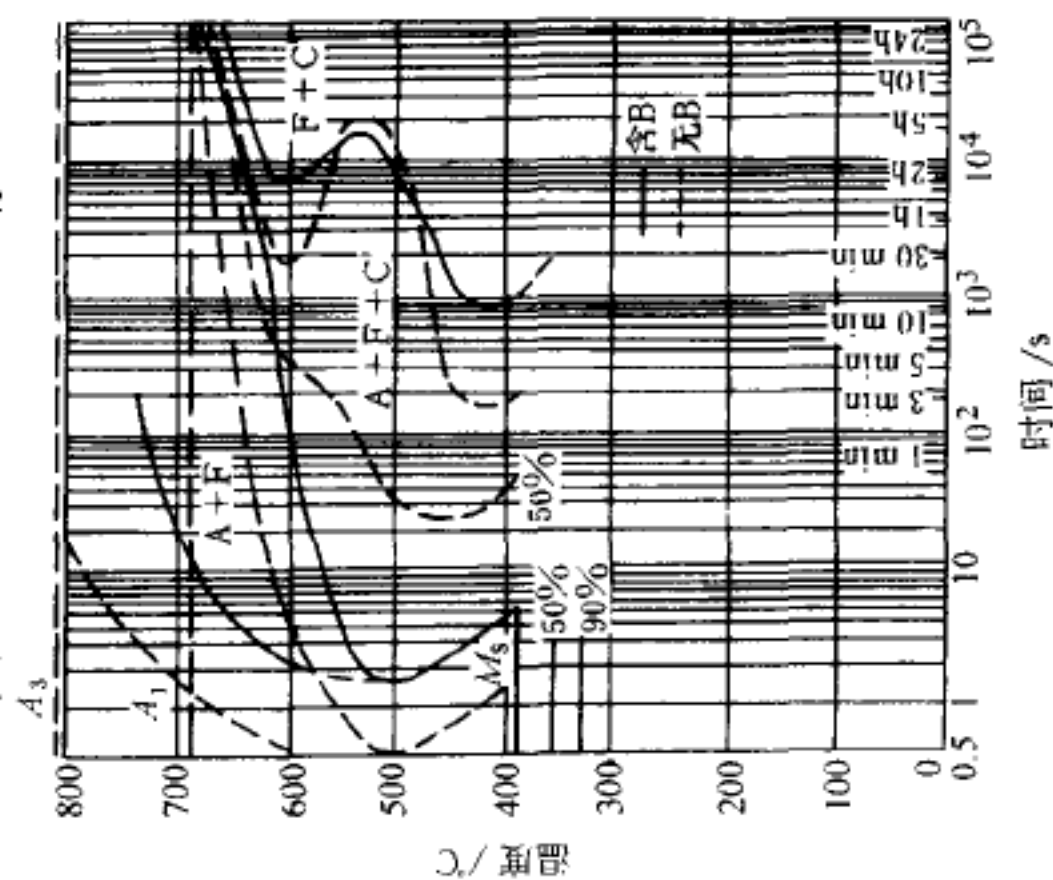
表图 5.1-7 65 钢



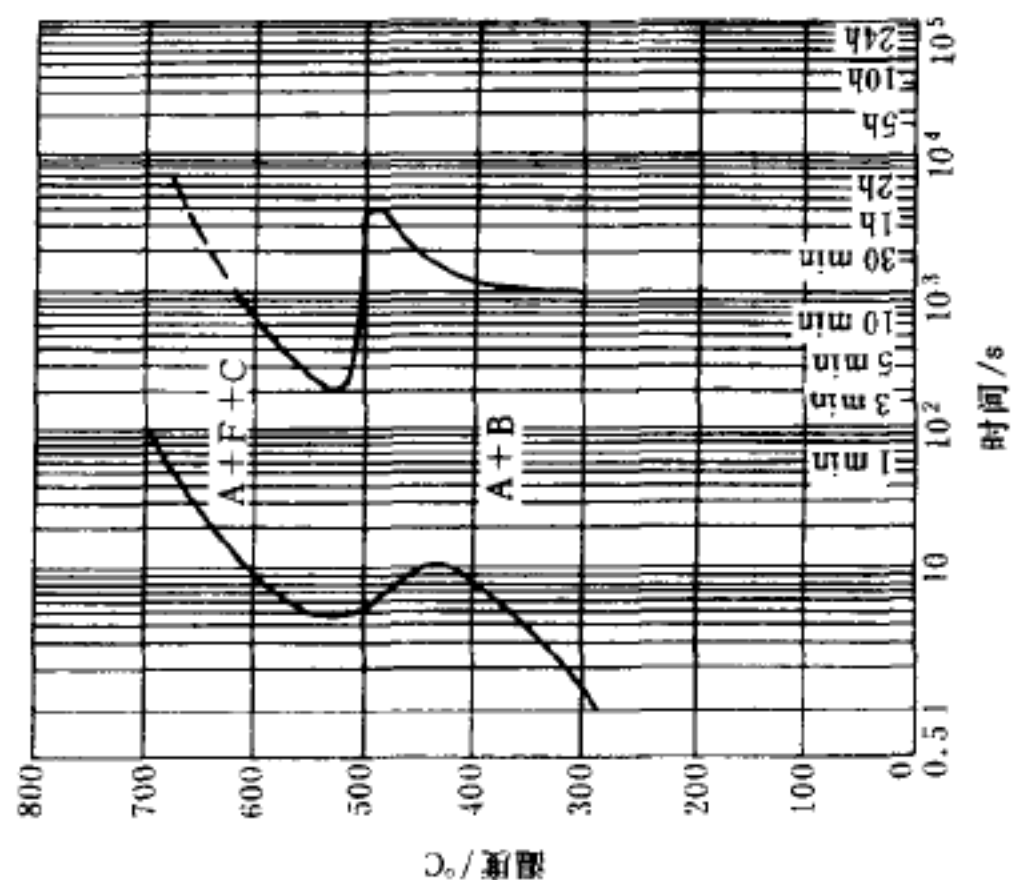
表图 5.1-10 14MnVTiRE 钢



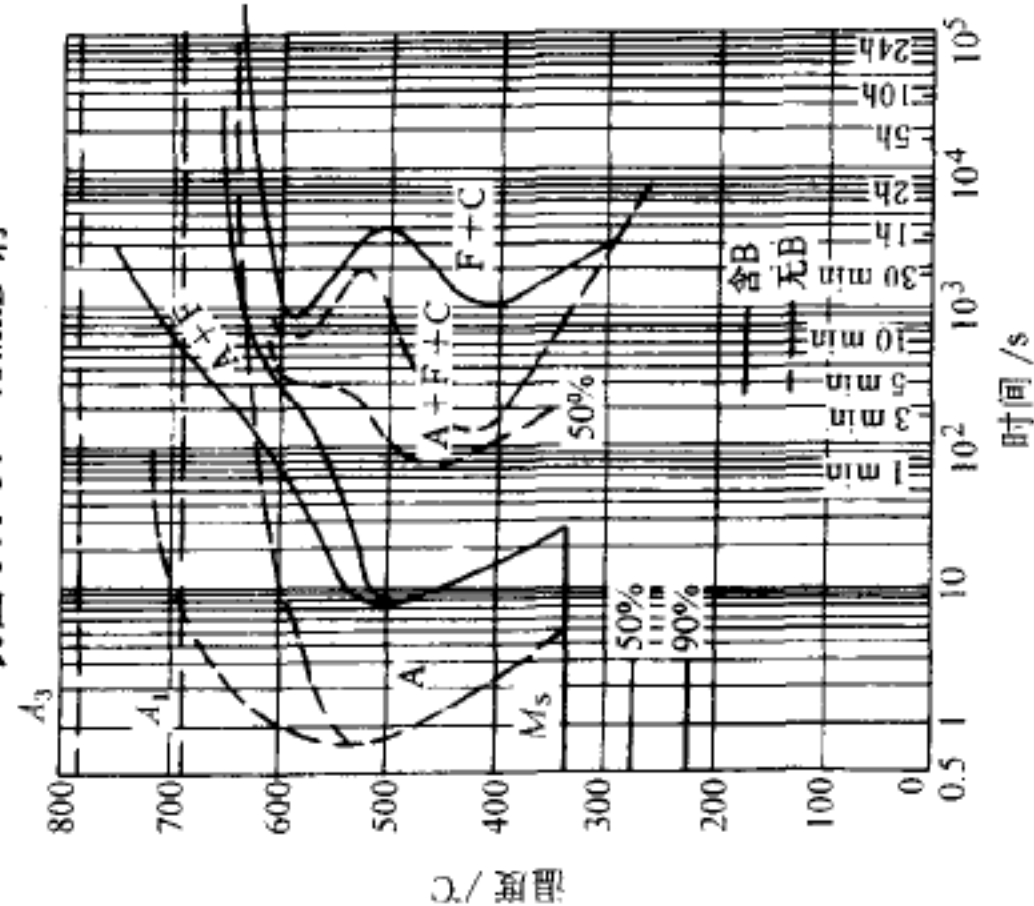
表图 5.1-13 18MnMoNb 钢



表图 5.1-16 20Mn2B 钢与 20Mn2 钢

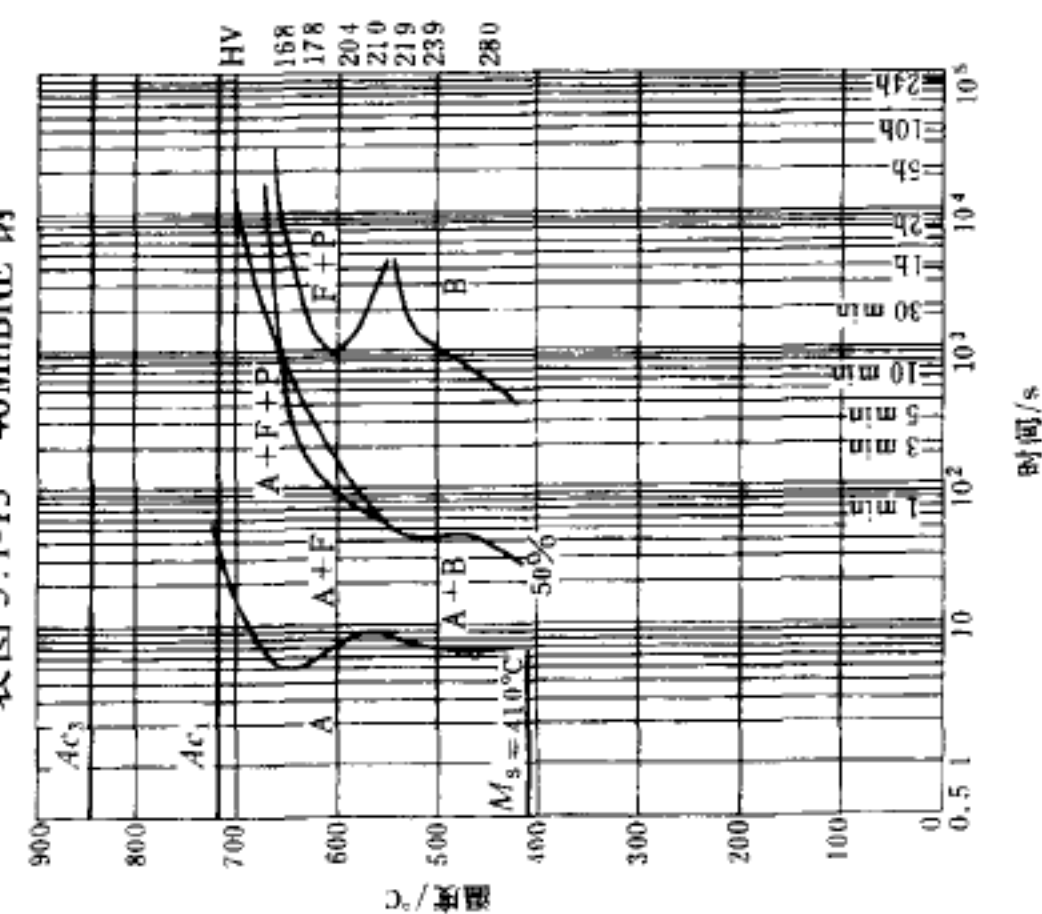


表图 5.1-14 40MnB 钢

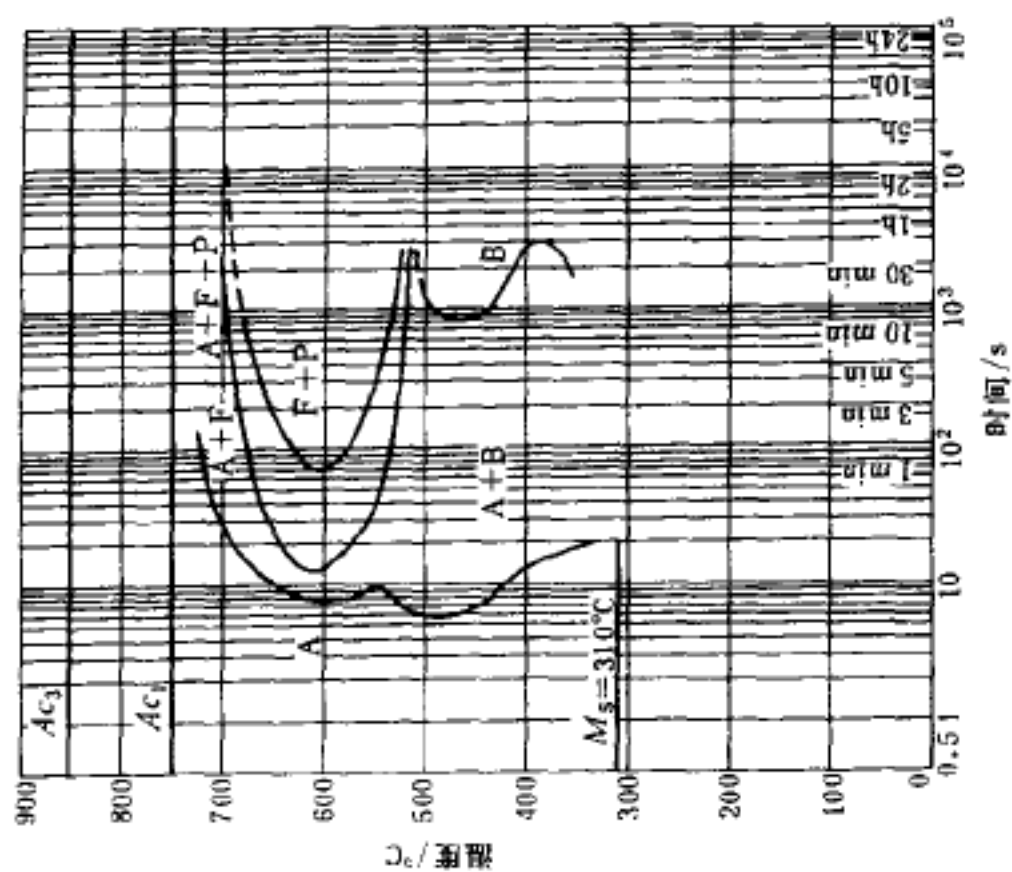


表图 5.1-17 20Mn2B 钢与 20Mn2 钢(渗 C 后)

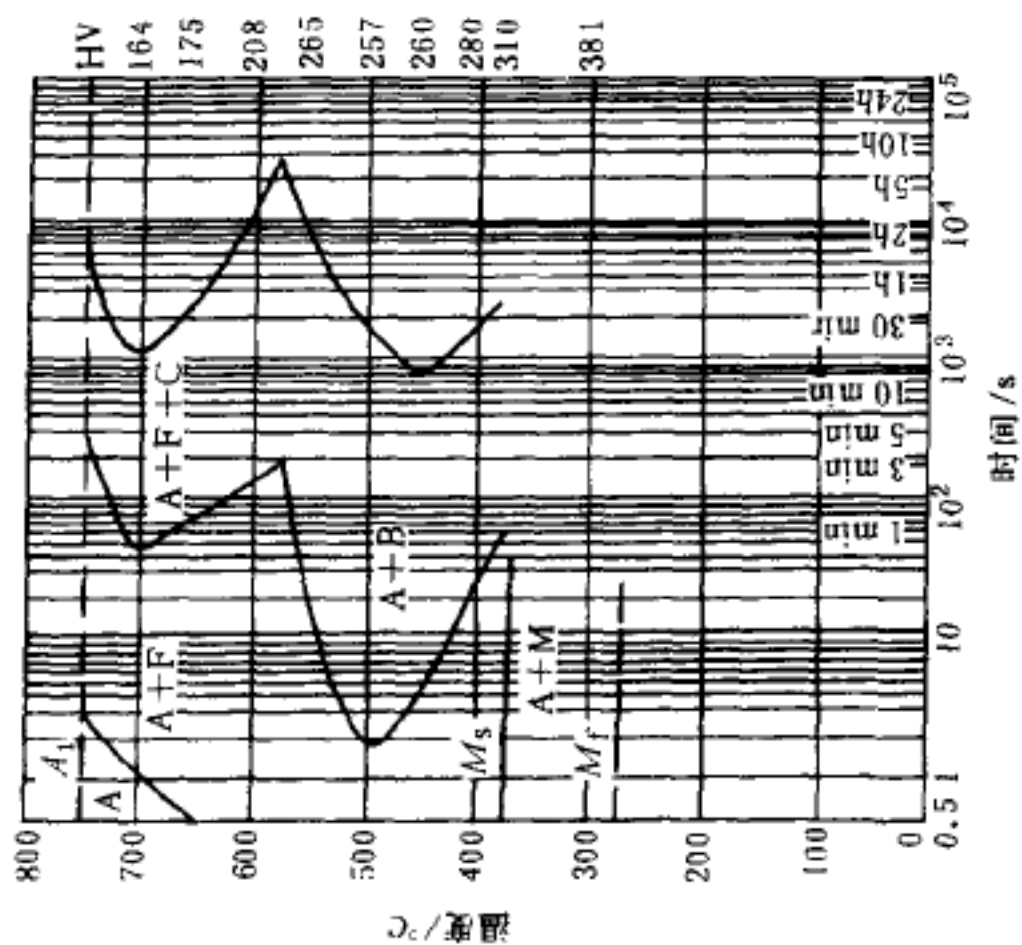
表图 5.1-15 40MnBRe 钢



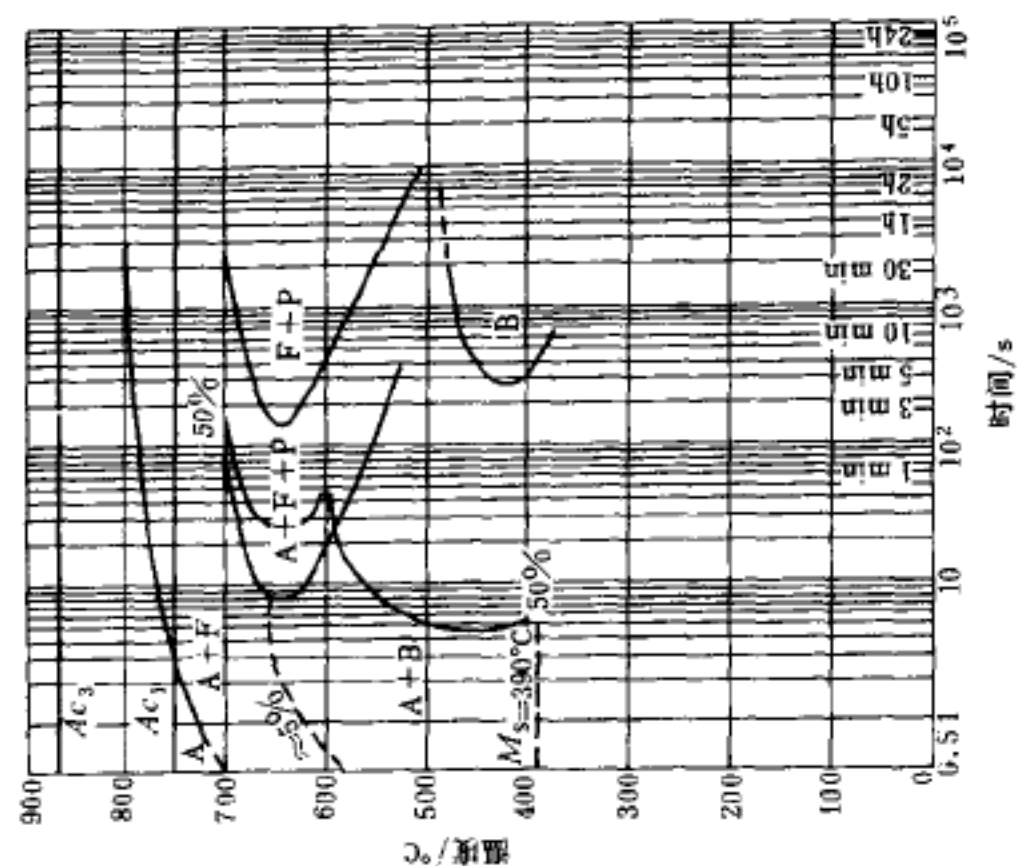
表图 5.1-18 20Mn2TiB 钢



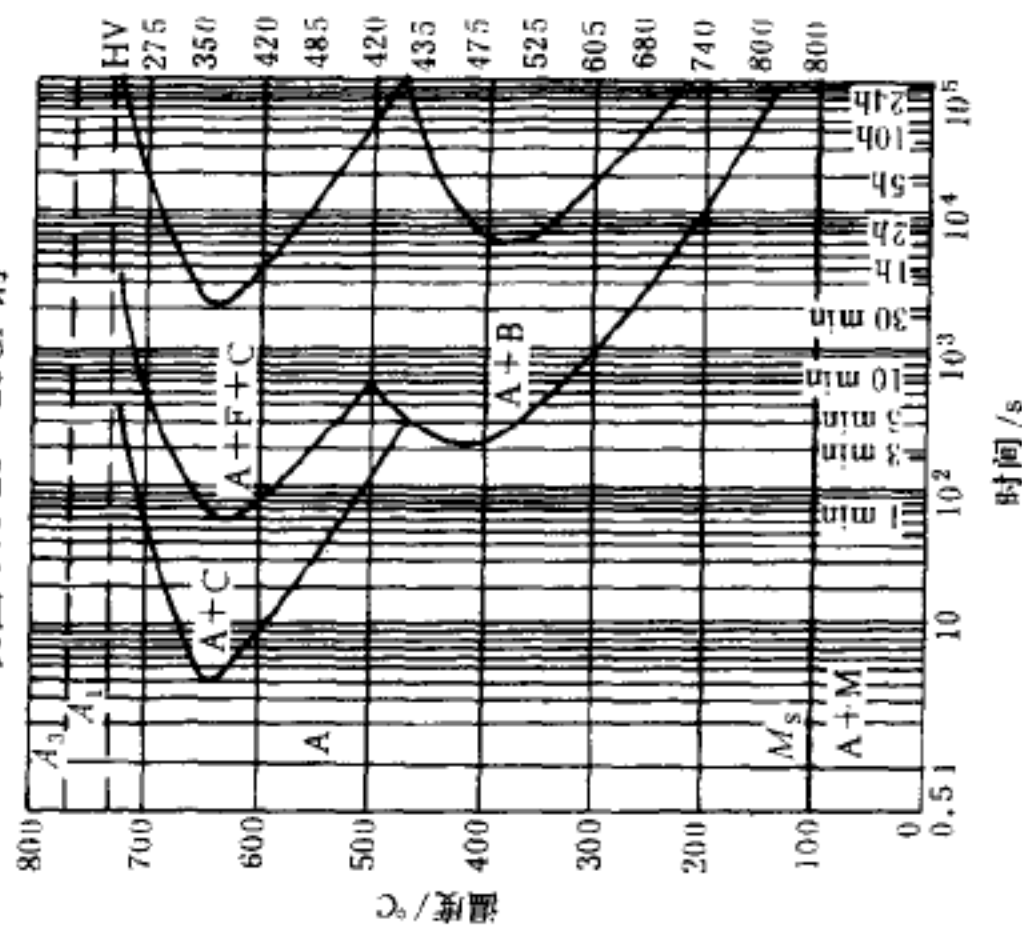
表图 5.1-19 35SiMn 钢



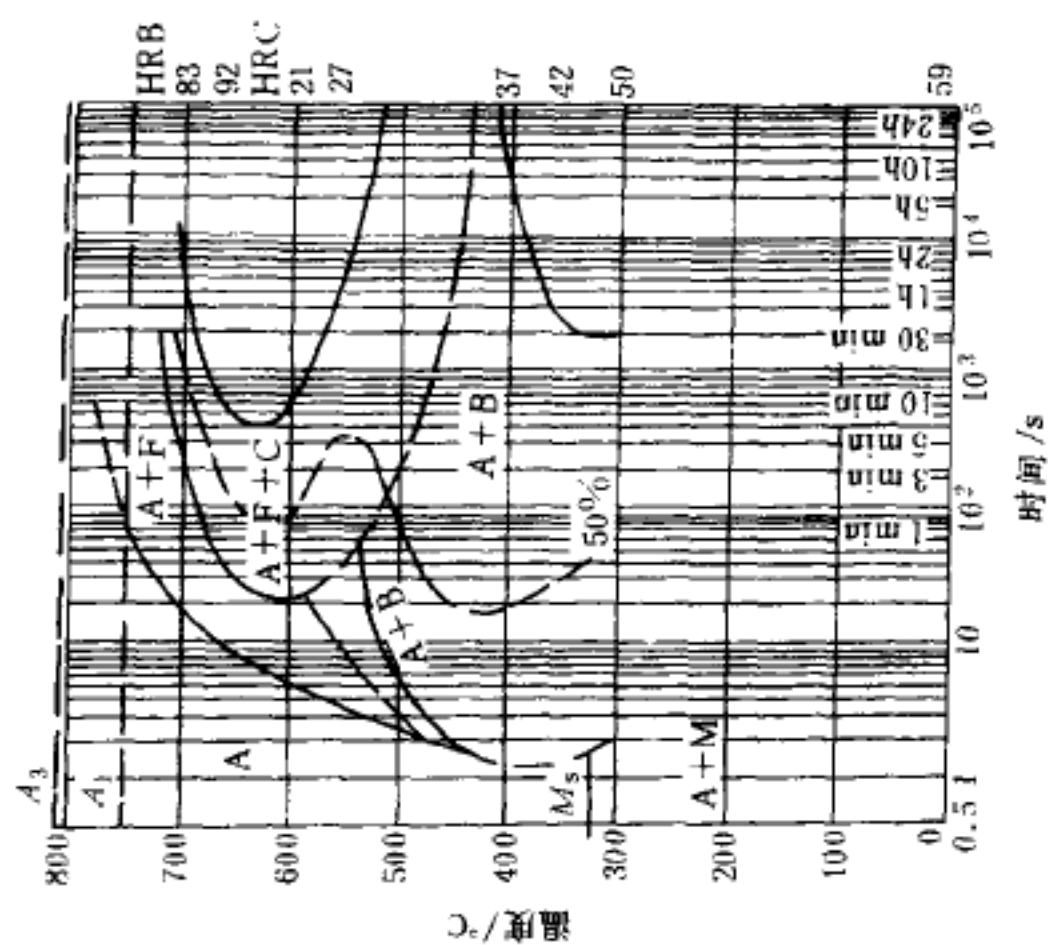
表图 5.1-22 20CrMo 钢



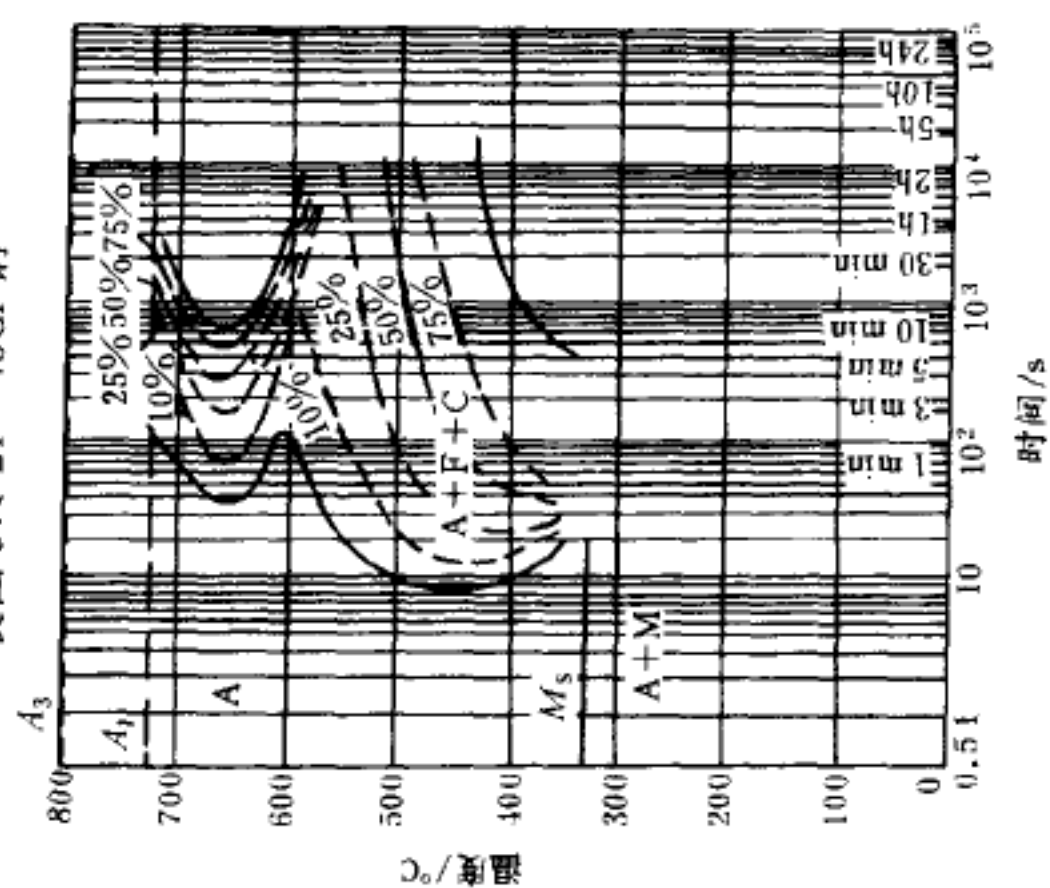
表图 5.1-20 20CrMo 钢



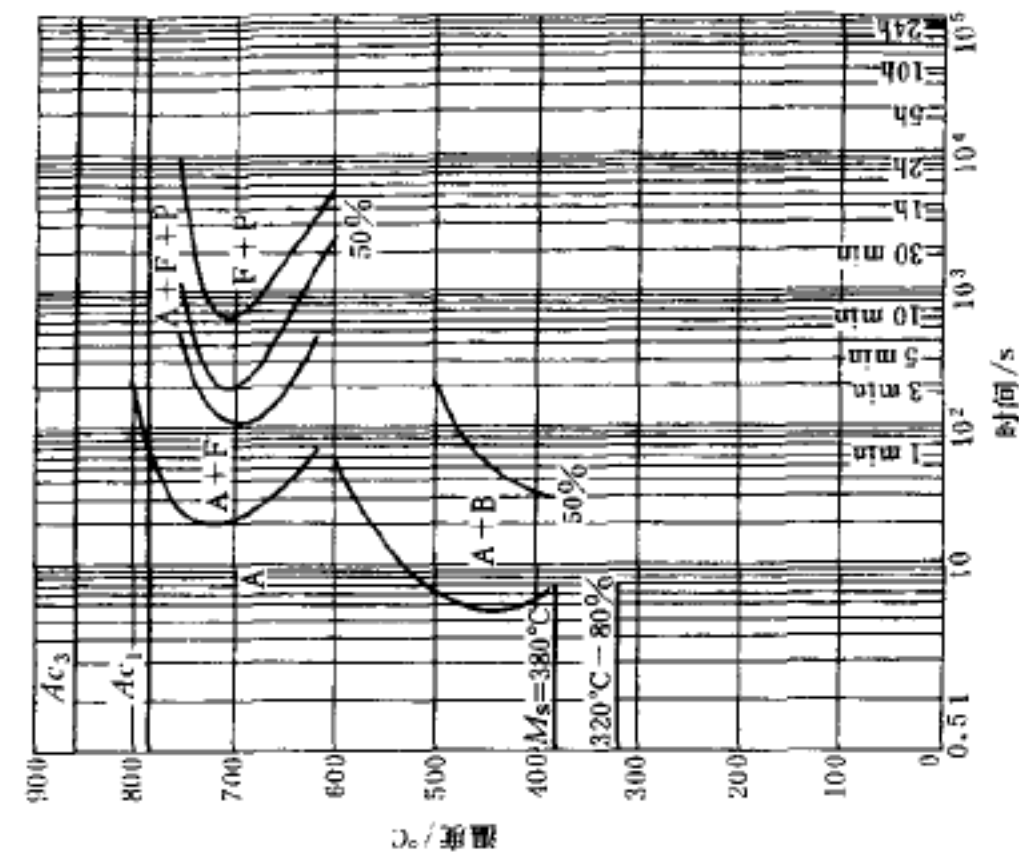
表图 5.1-23 20CrMo 钢(渗 C 后)



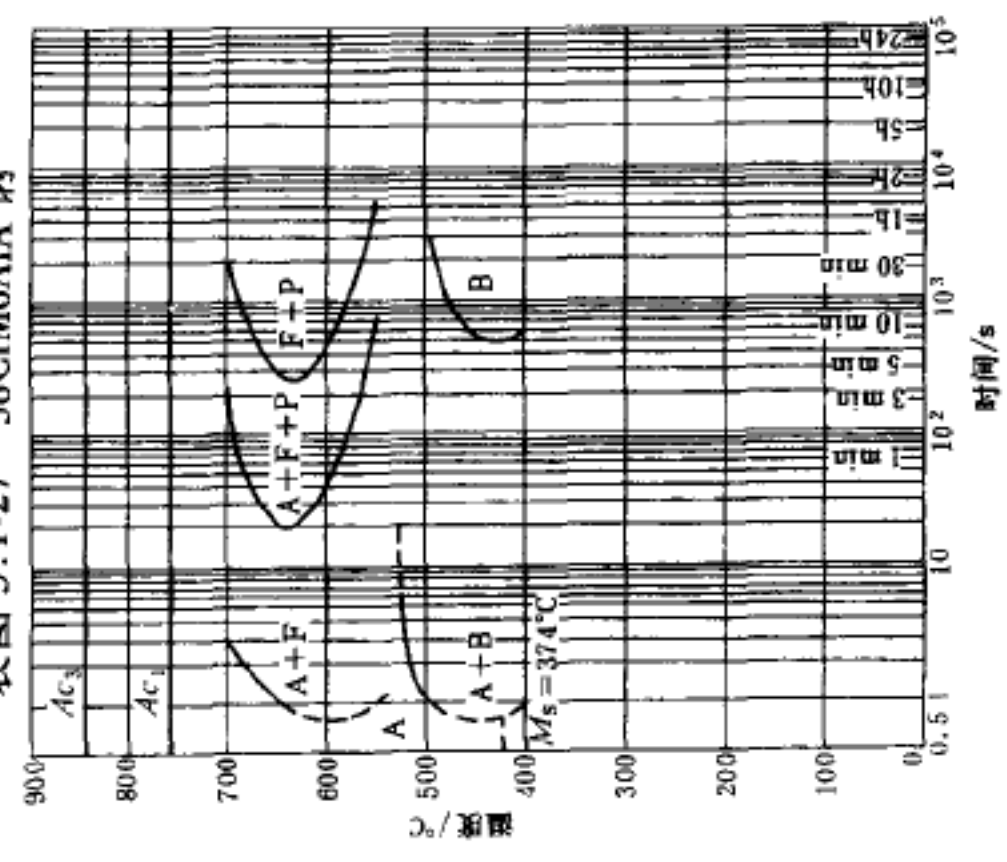
表图 5.1-21 40Cr 钢



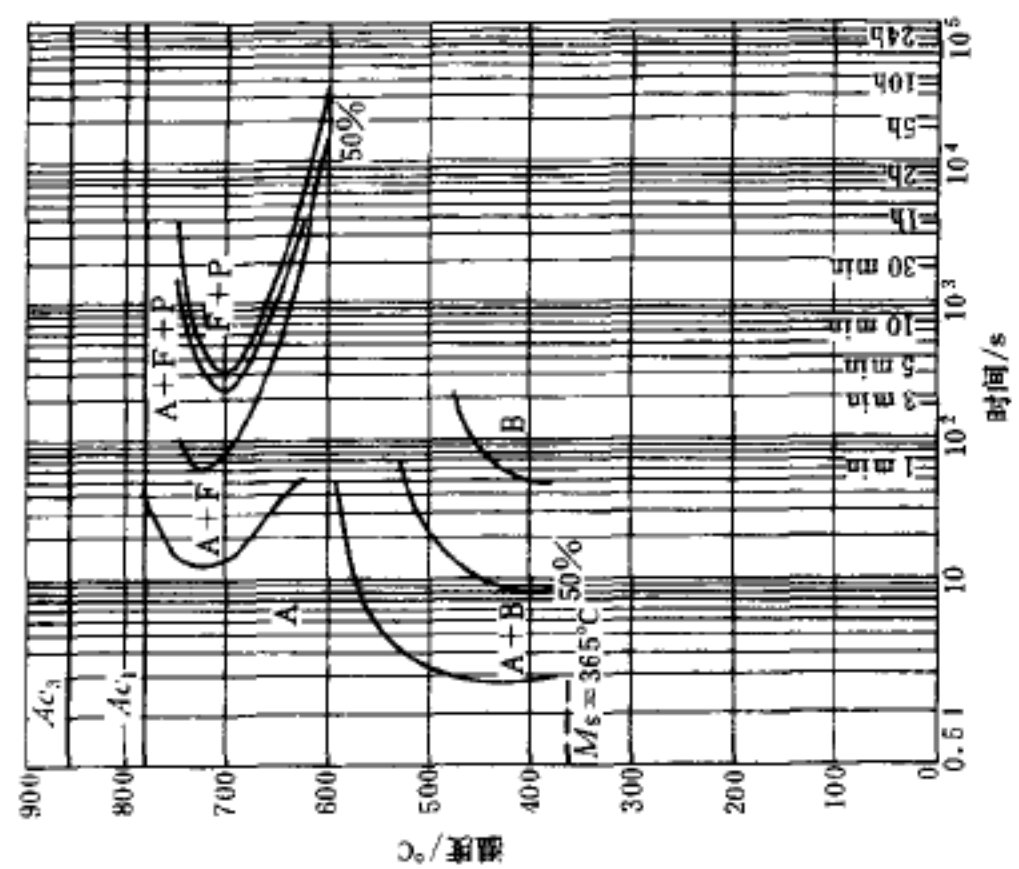
表图 5.1-24 35CrMo 钢



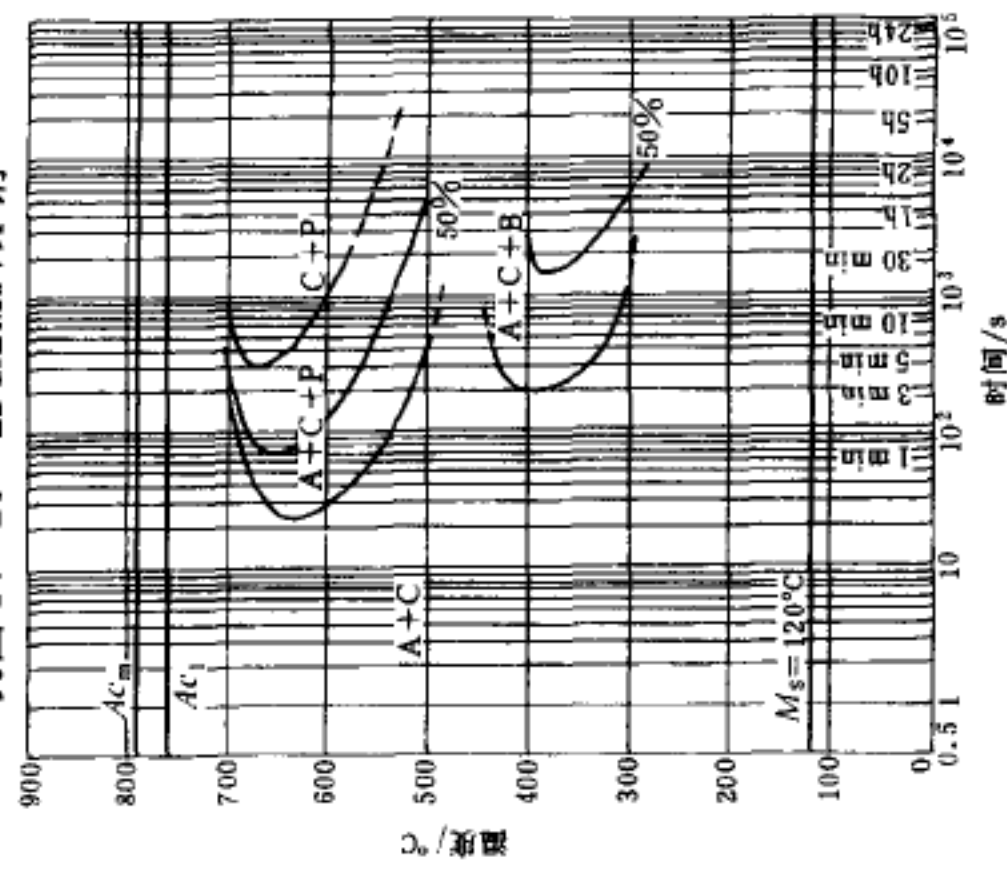
表图 5.1-27 38CrMoAlA 钢



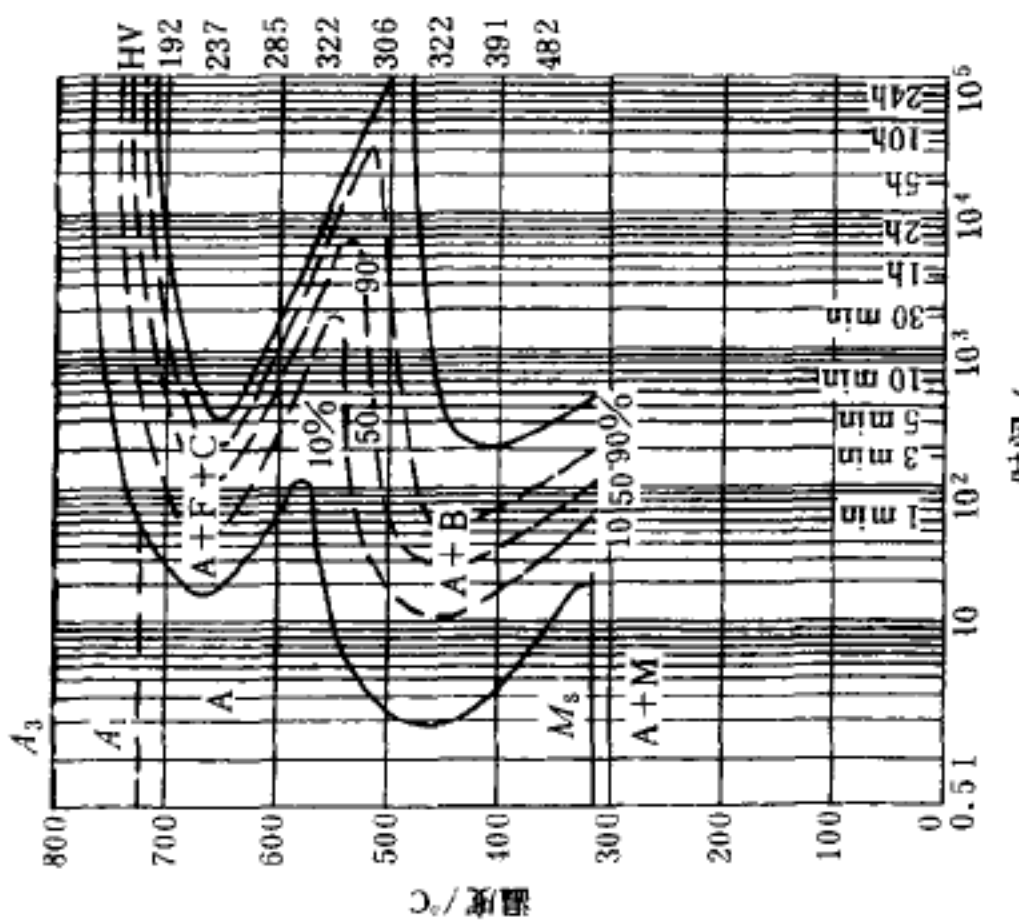
表图 5.1-28 35CrMnSiA 钢



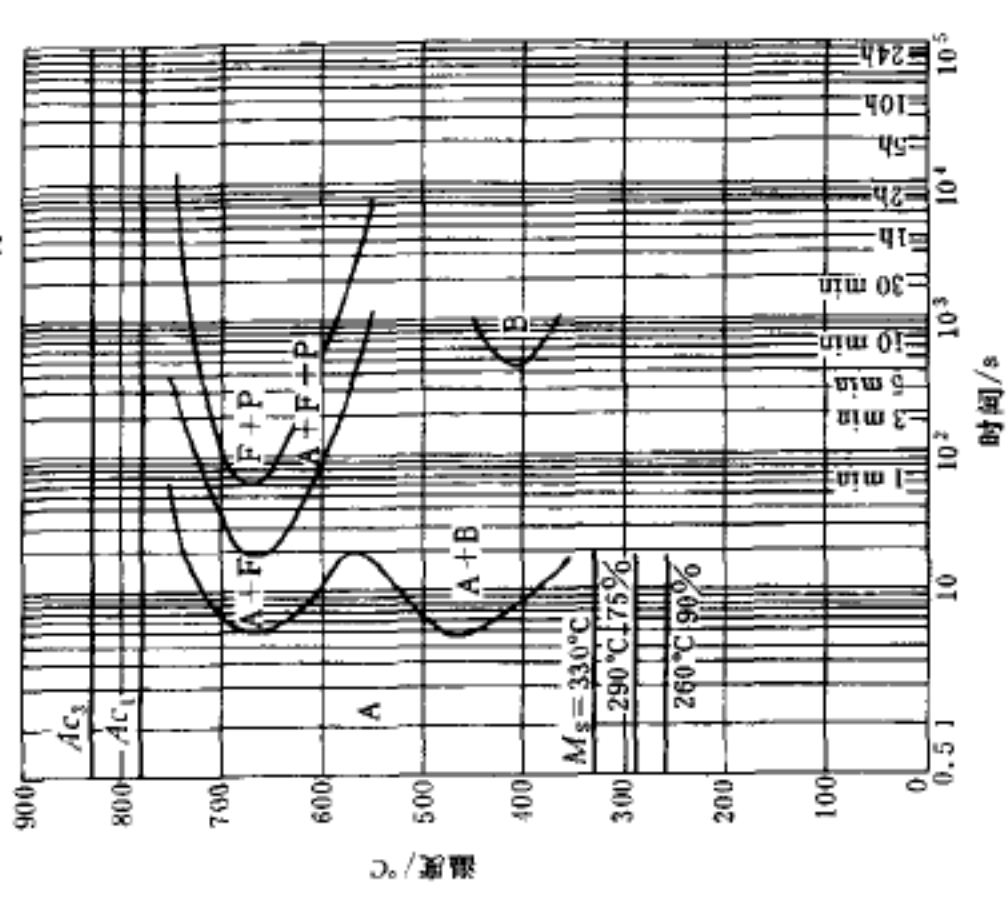
表图 5.1-25 45CrMo 钢



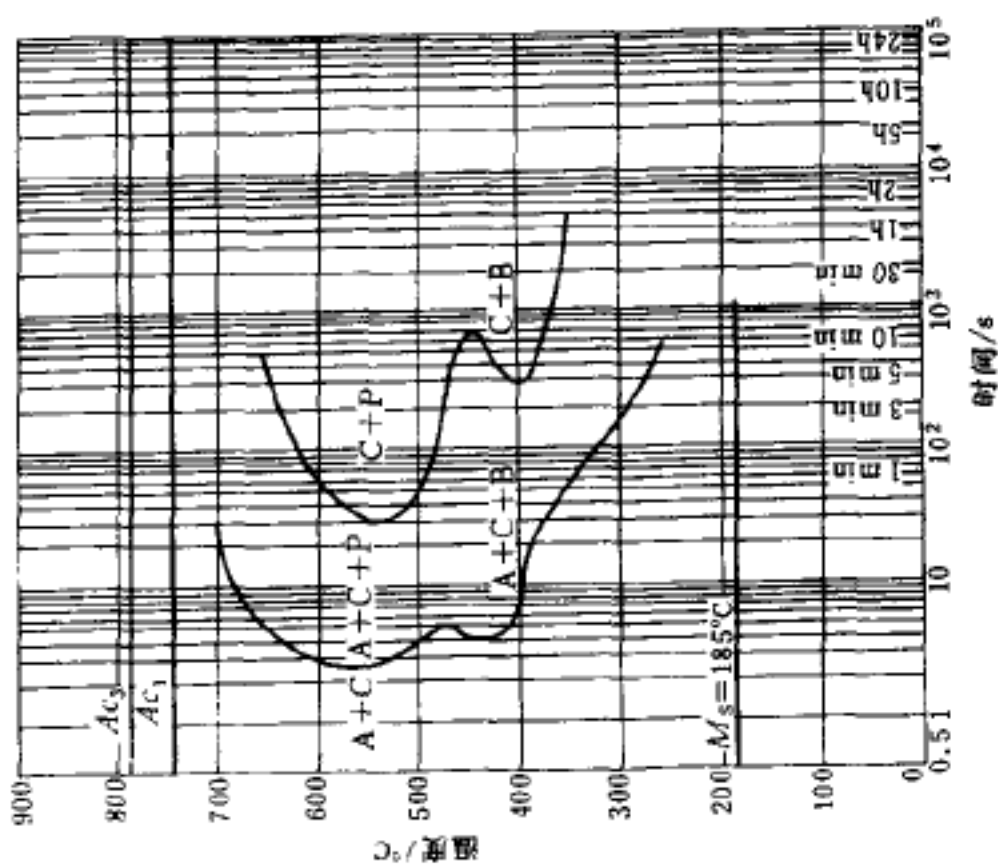
表图 5.1-26 25Cr2MoVA 钢



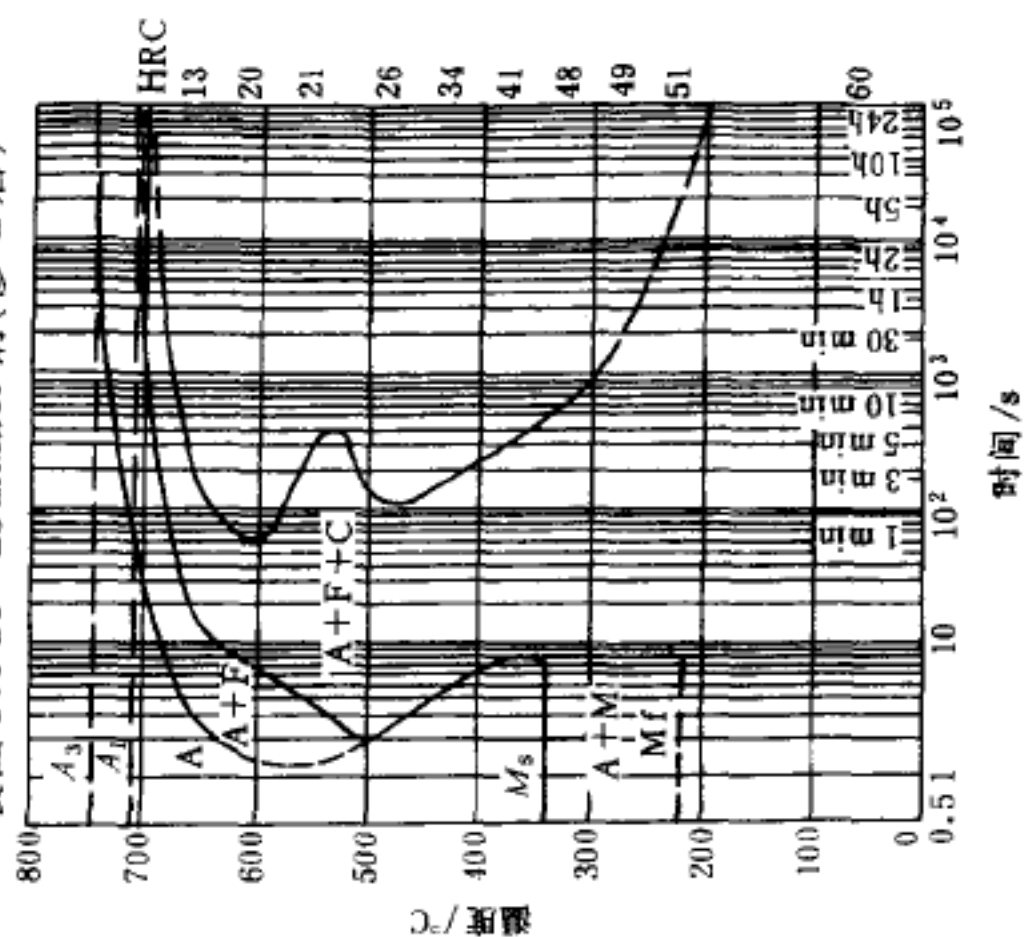
表图 5.1-29 20Cr2Mn2MoA 钢 (渗 C 后)



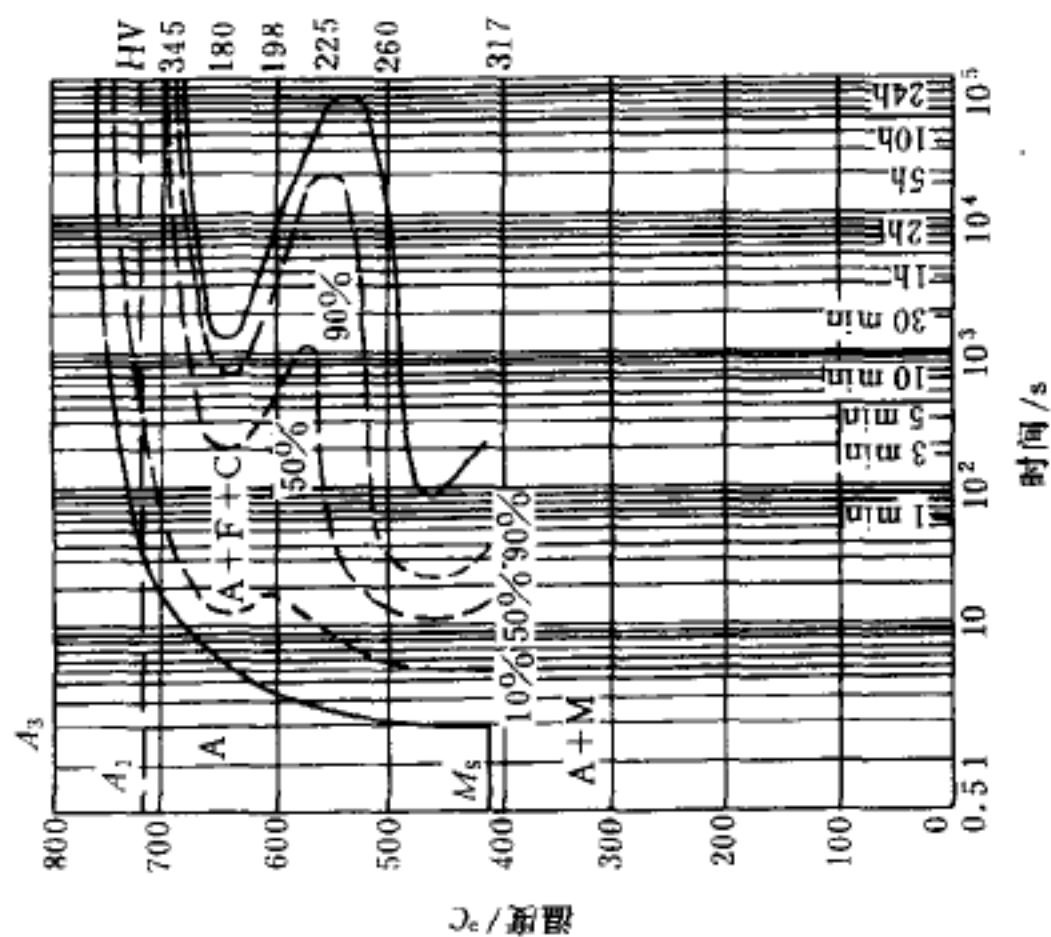
表图 5.1-30 20CrMnTi 钢



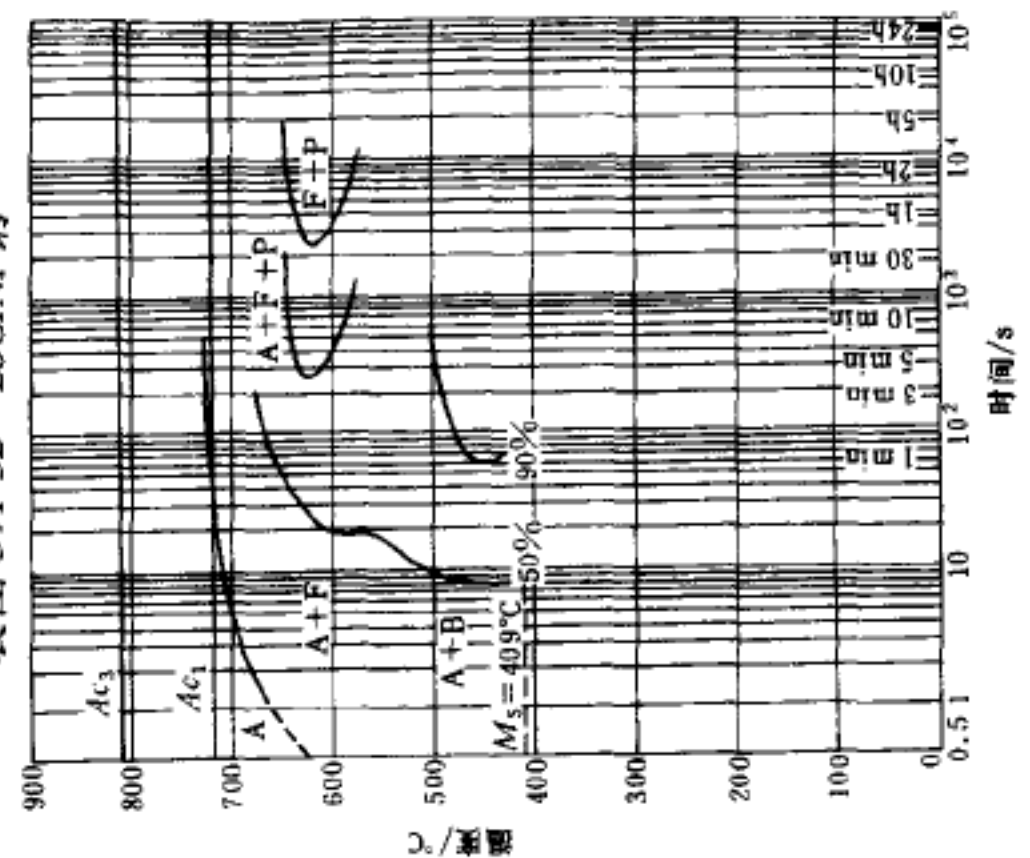
表图 5.1-31 20CrMnTi 钢 (渗 C 后)



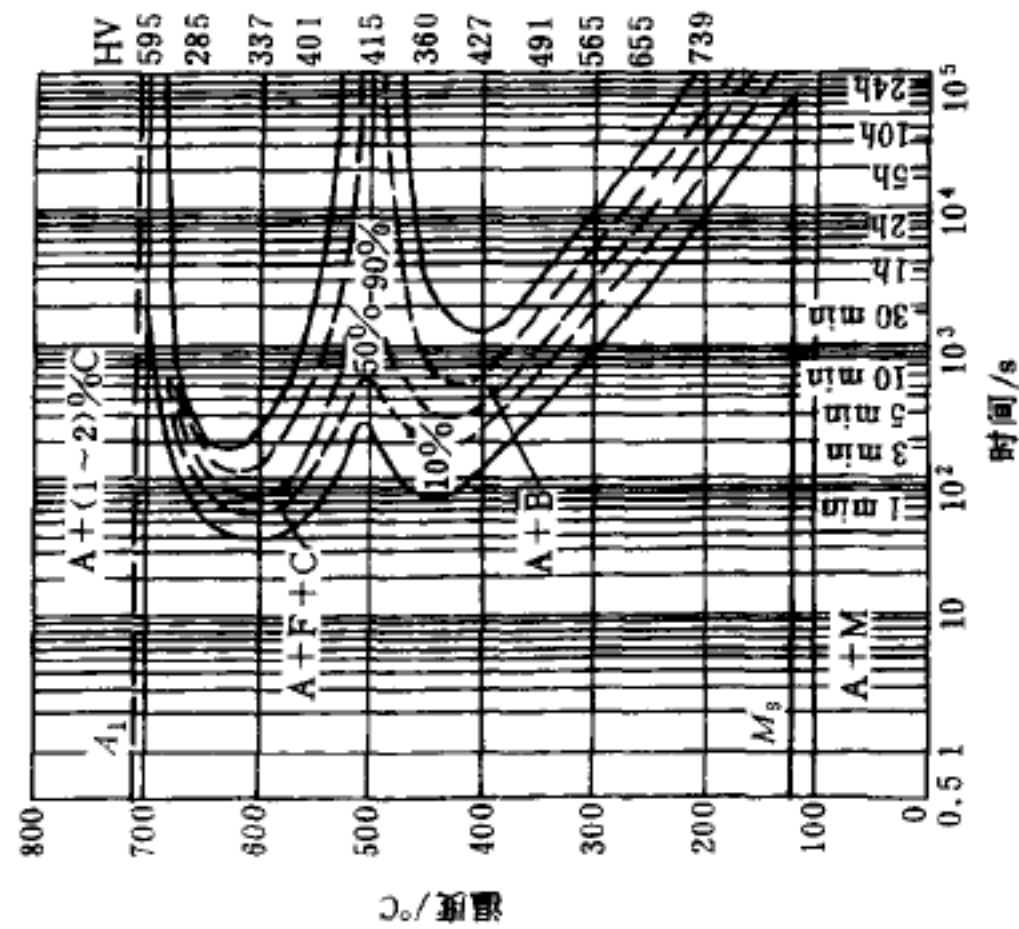
表图 5.1-34 40CrNi 钢



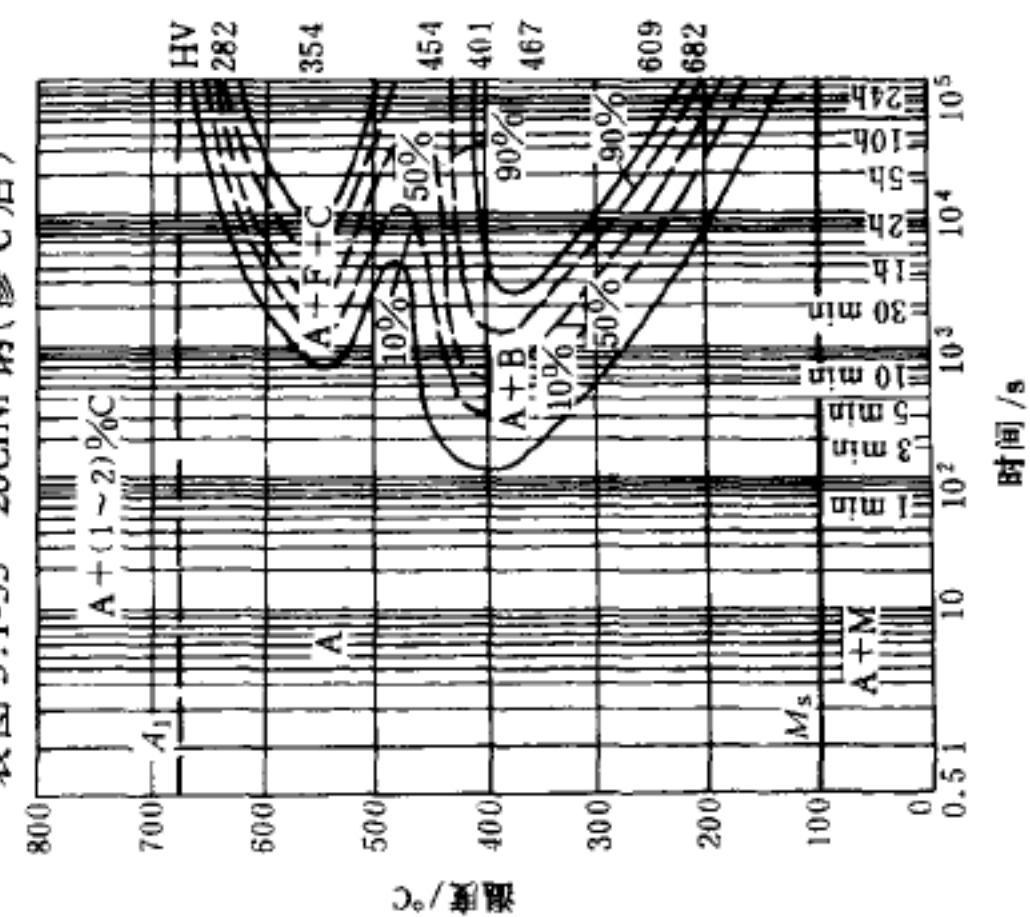
表图 5.1-32 20CrNi 钢



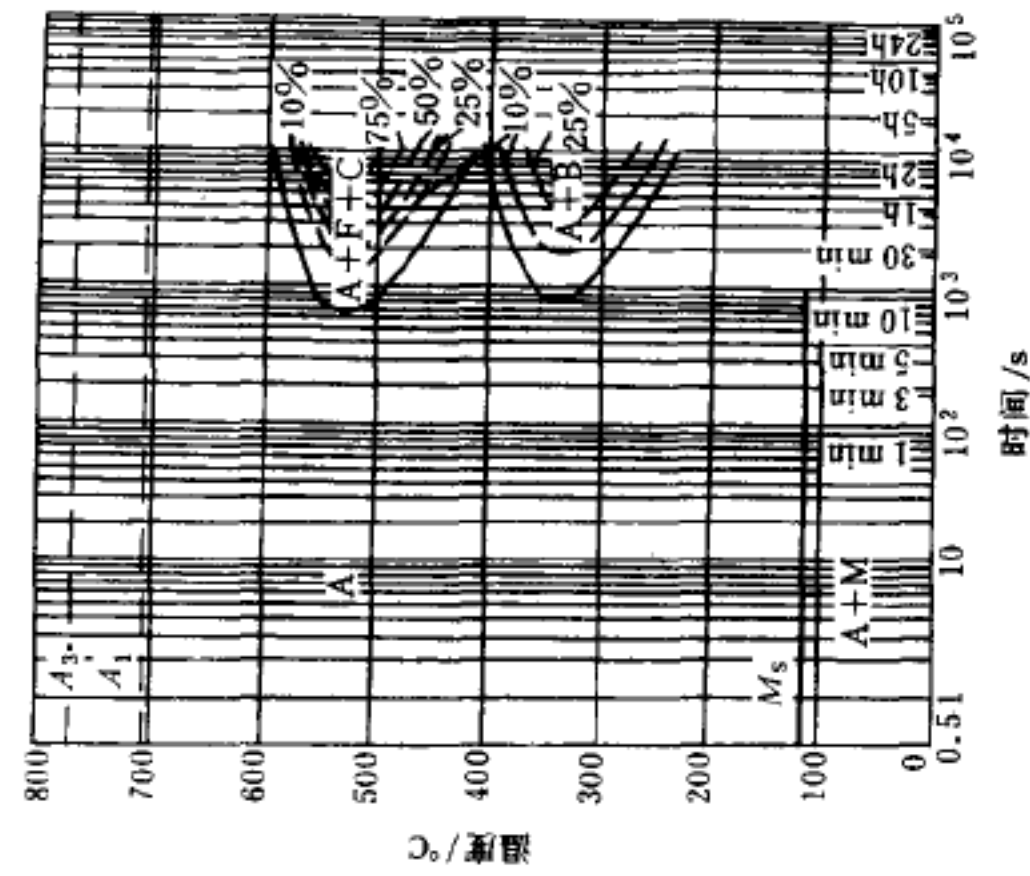
表图 5.1-35 12CrNi3 钢



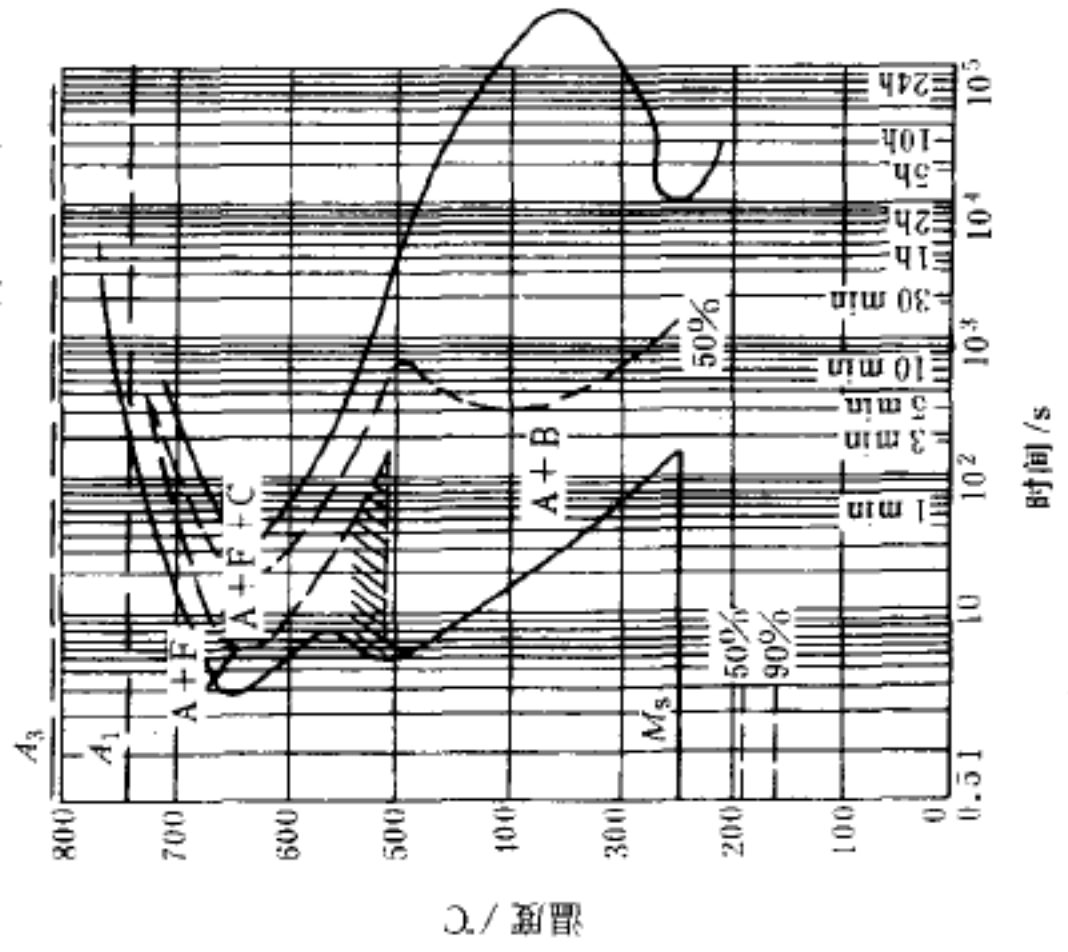
表图 5.1-33 20CrNi 钢 (渗 C 后)



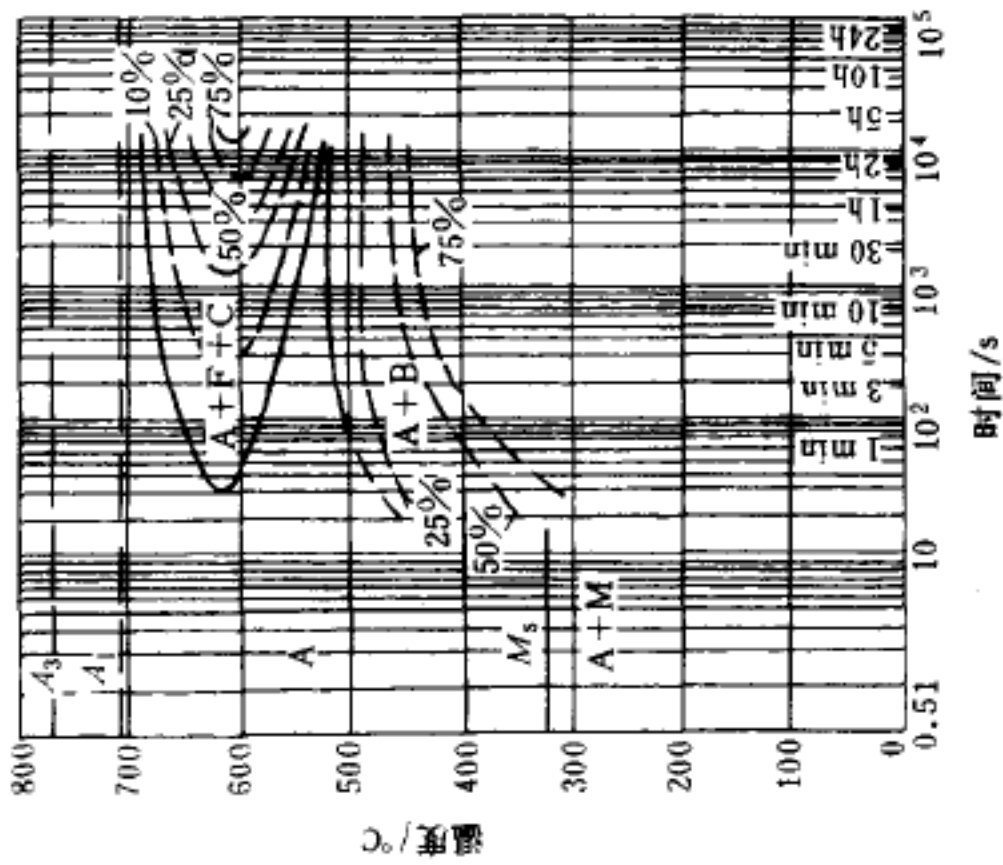
表图 5.1-36 12CrNi3 钢 (渗 C 后)



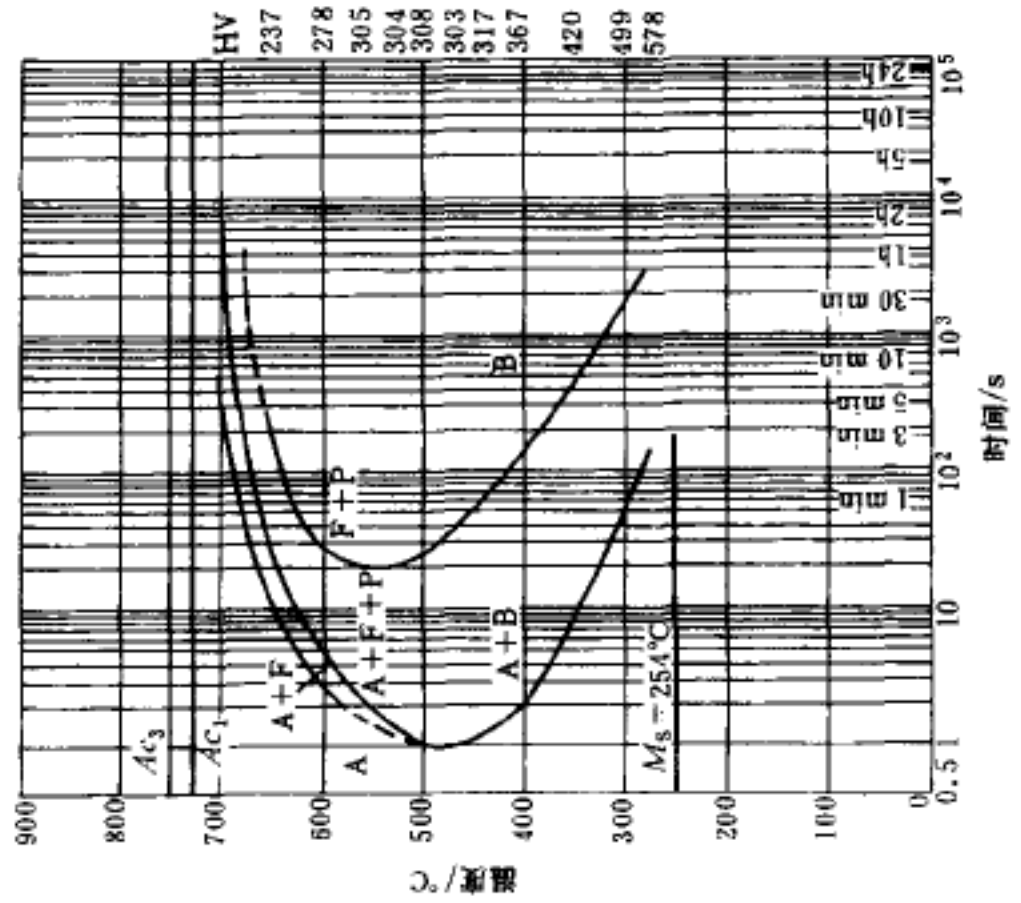
表图 5.1-39 20Cr2Ni4 钢(渗 C 后)



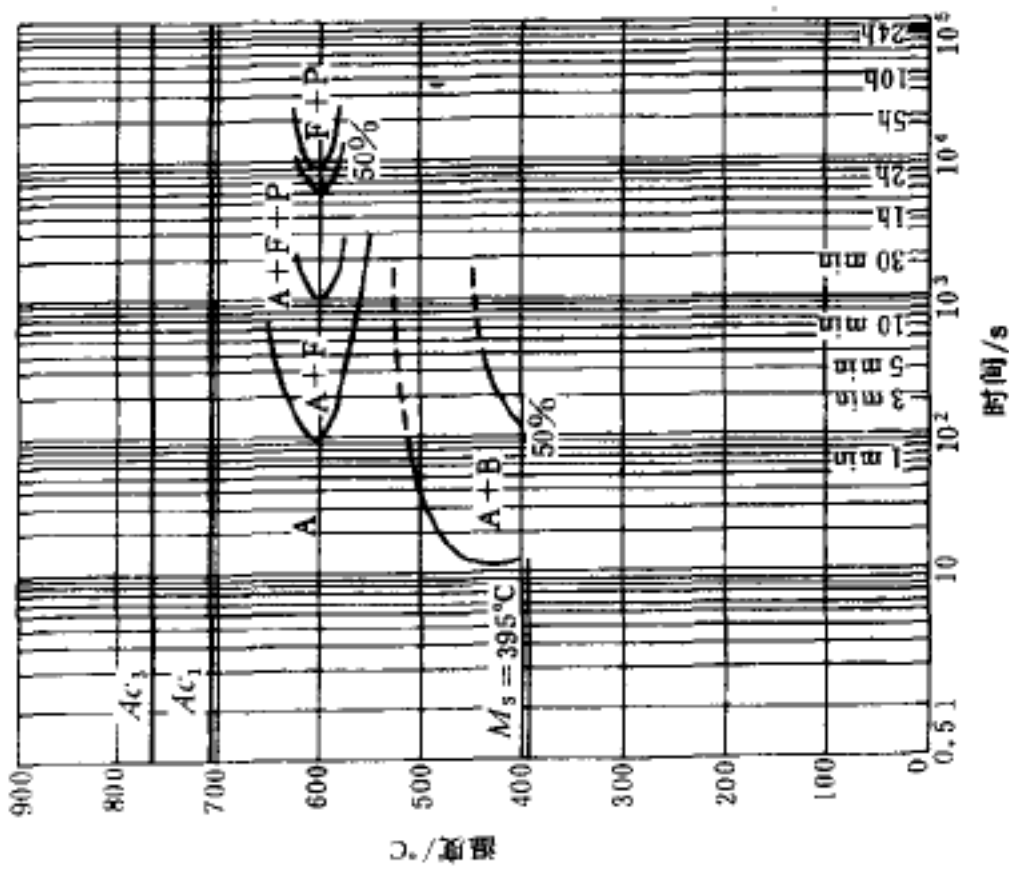
表图 5.1-40 40CrNiMo 钢



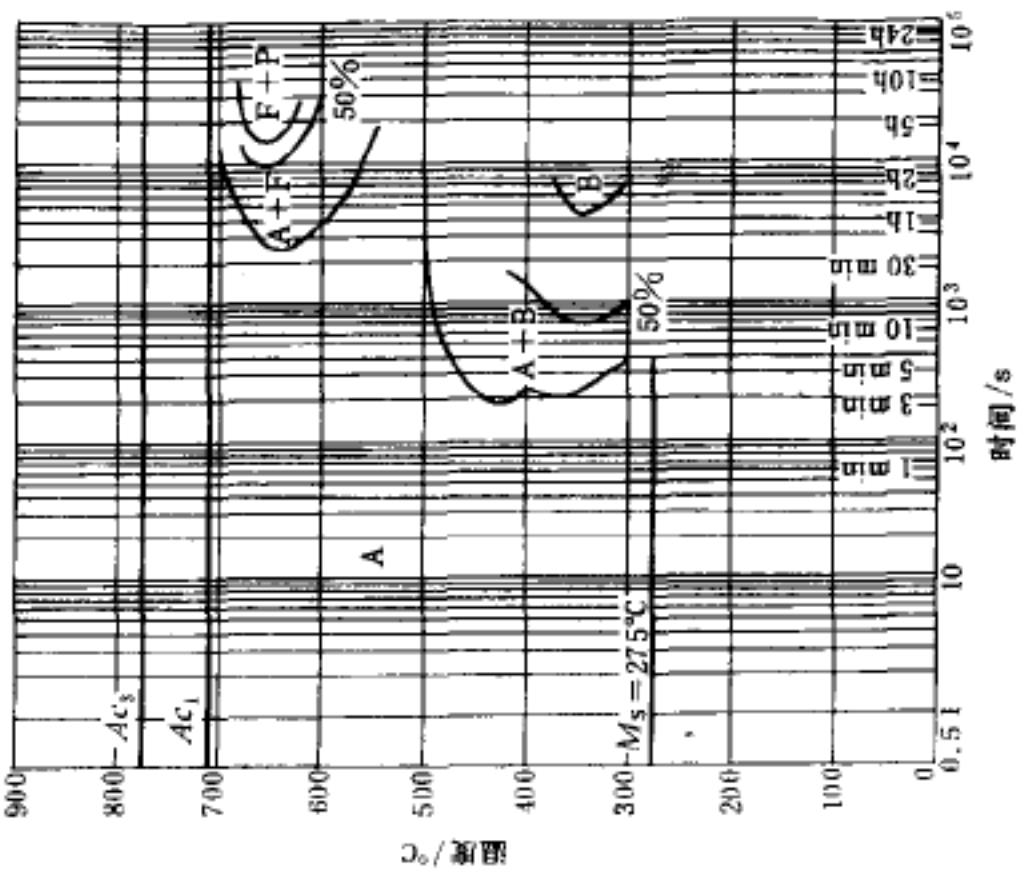
表图 5.1-38 20Cr2Ni4 钢



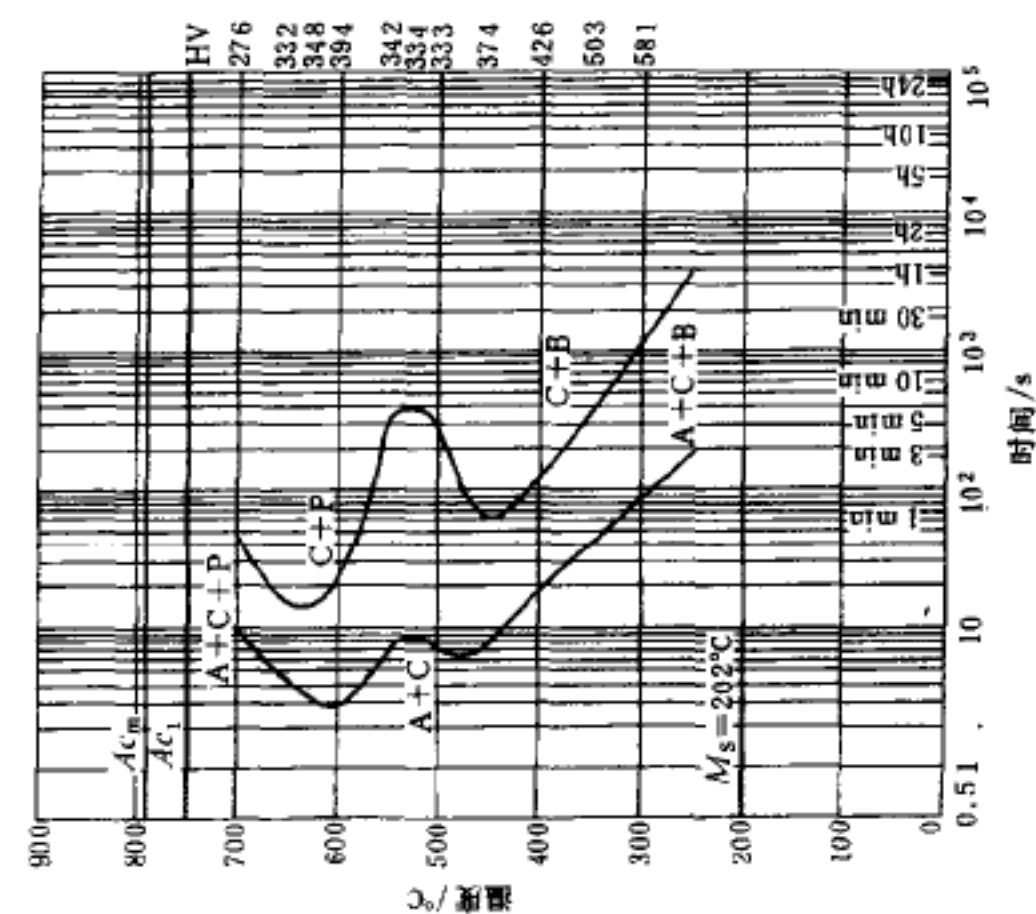
表图 5.1-41 65Mn 钢



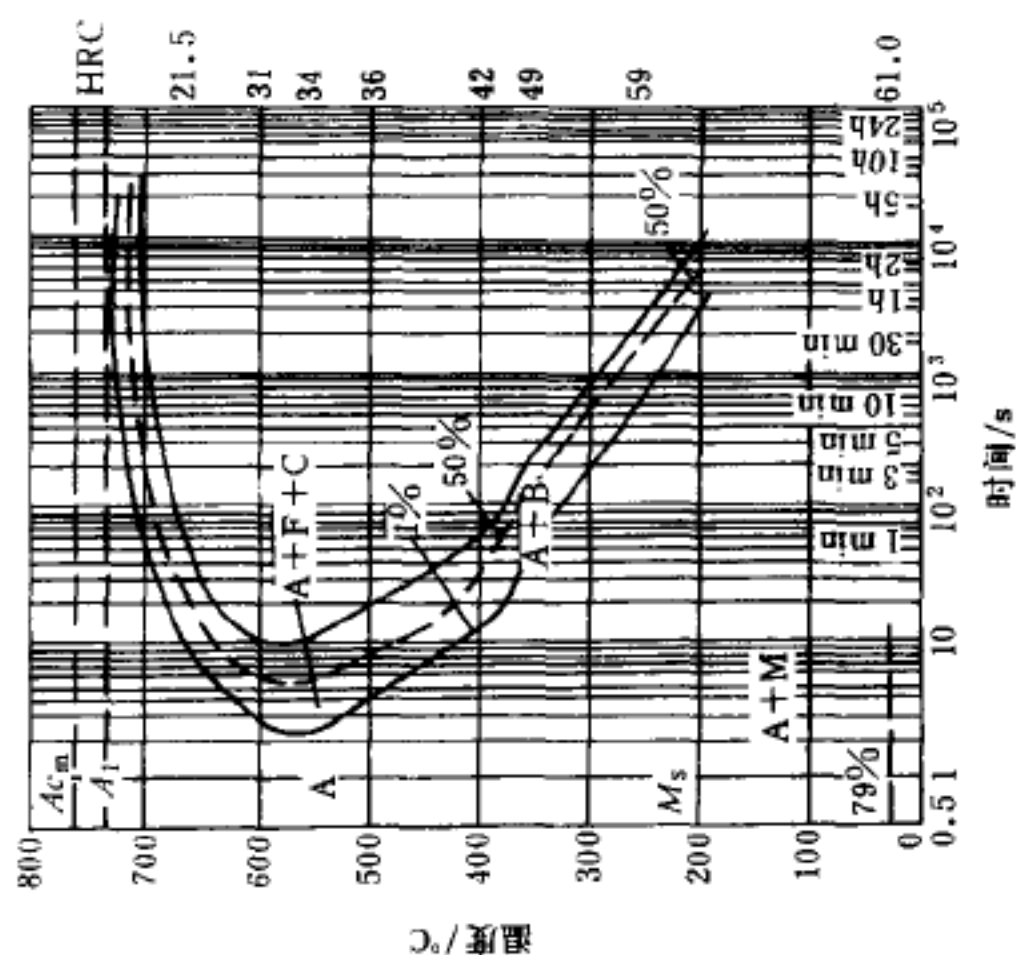
表图 5.1-37 20Cr2Ni4A 钢



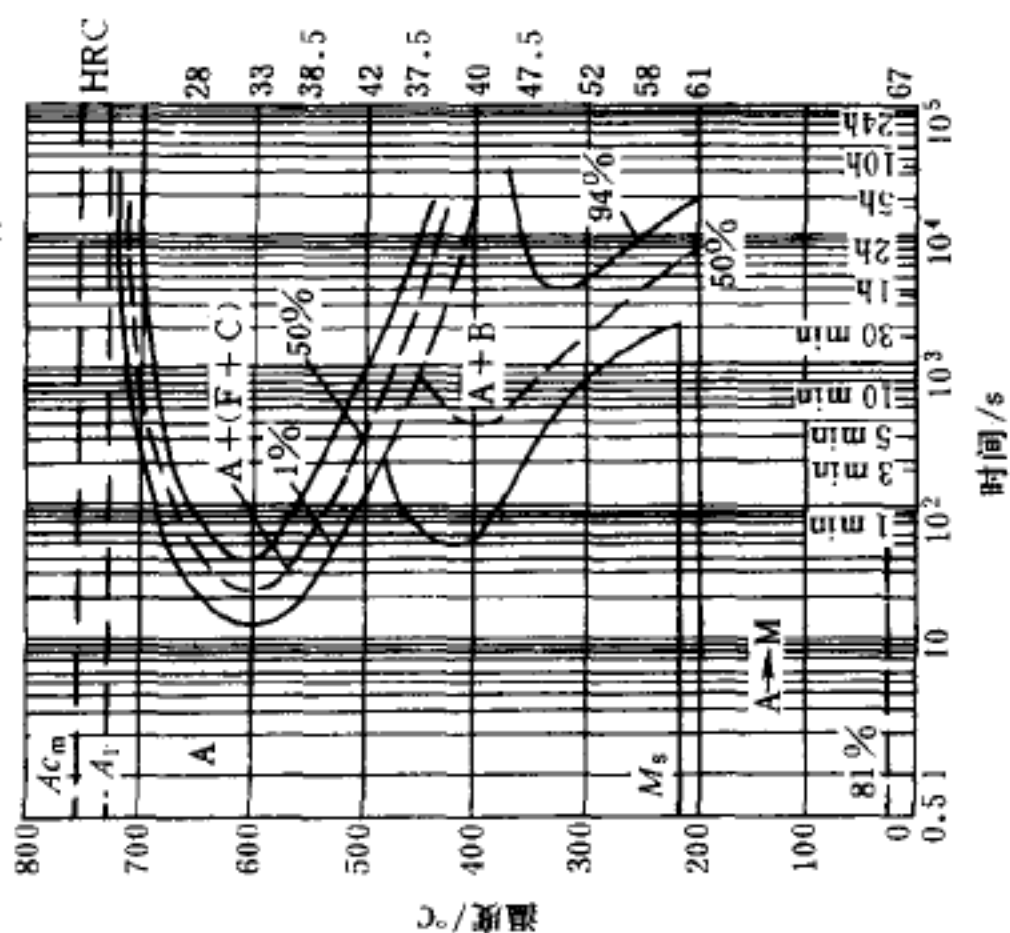
表图 5.1-42 60Si2Mn 钢



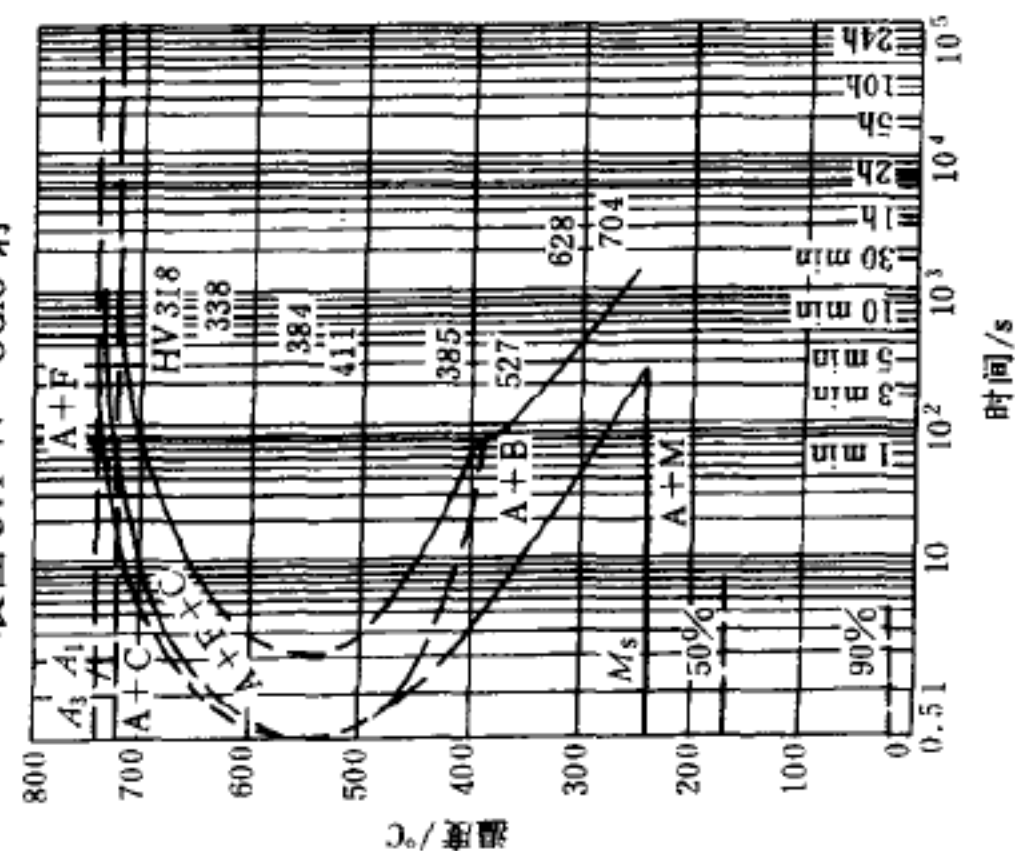
表图 5.1-43 55SiMnMoV 钢



表图 5.1-44 GCr6 钢

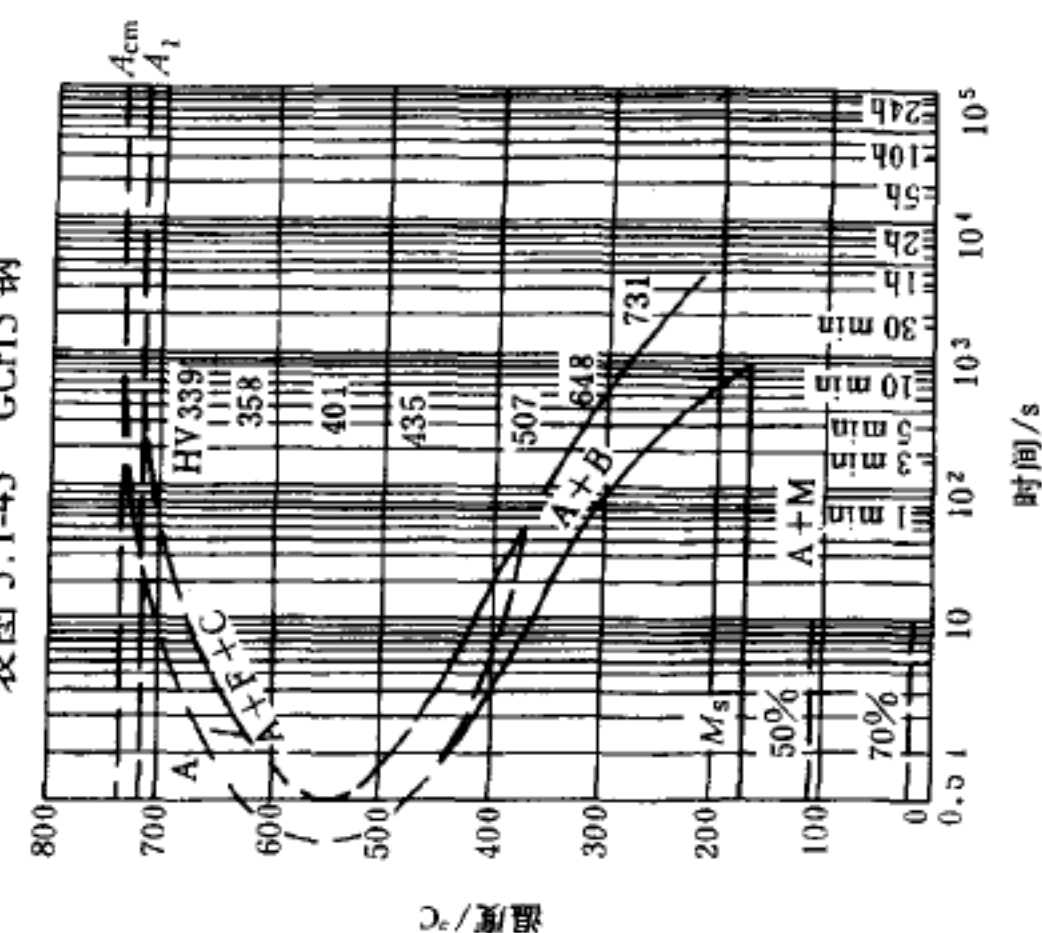


表图 5.1-46 GCr15SiMn 钢

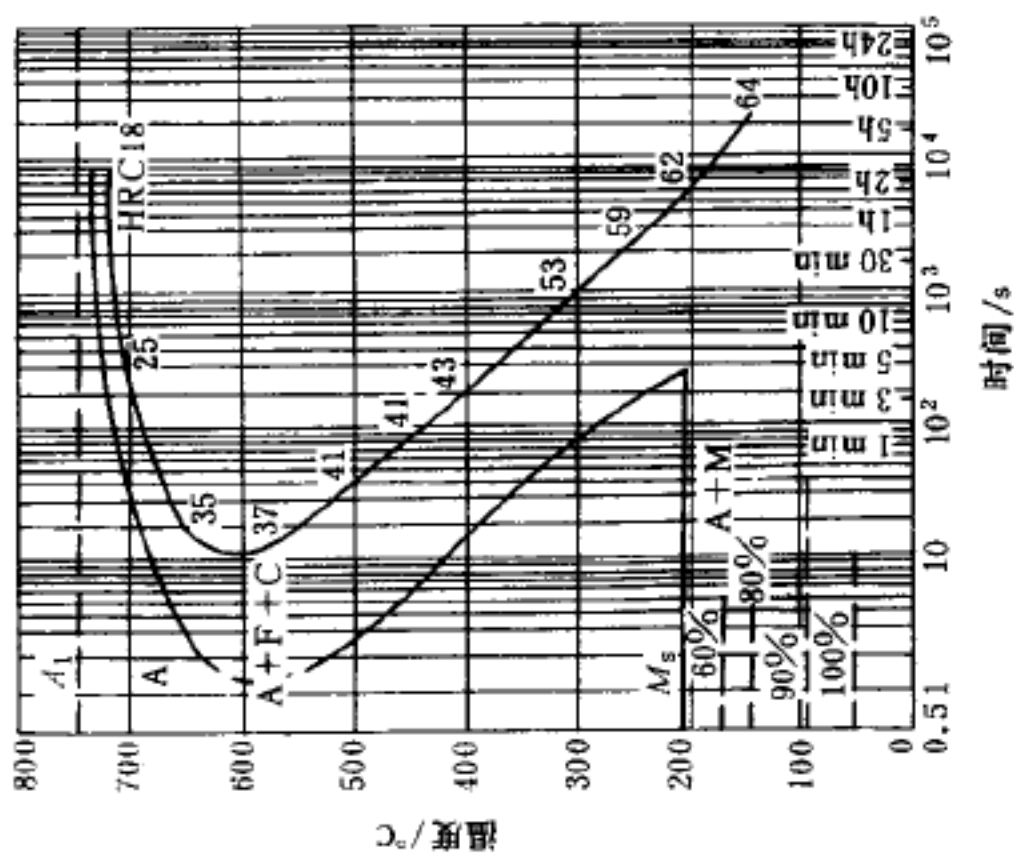


表图 5.1-47 T8 钢

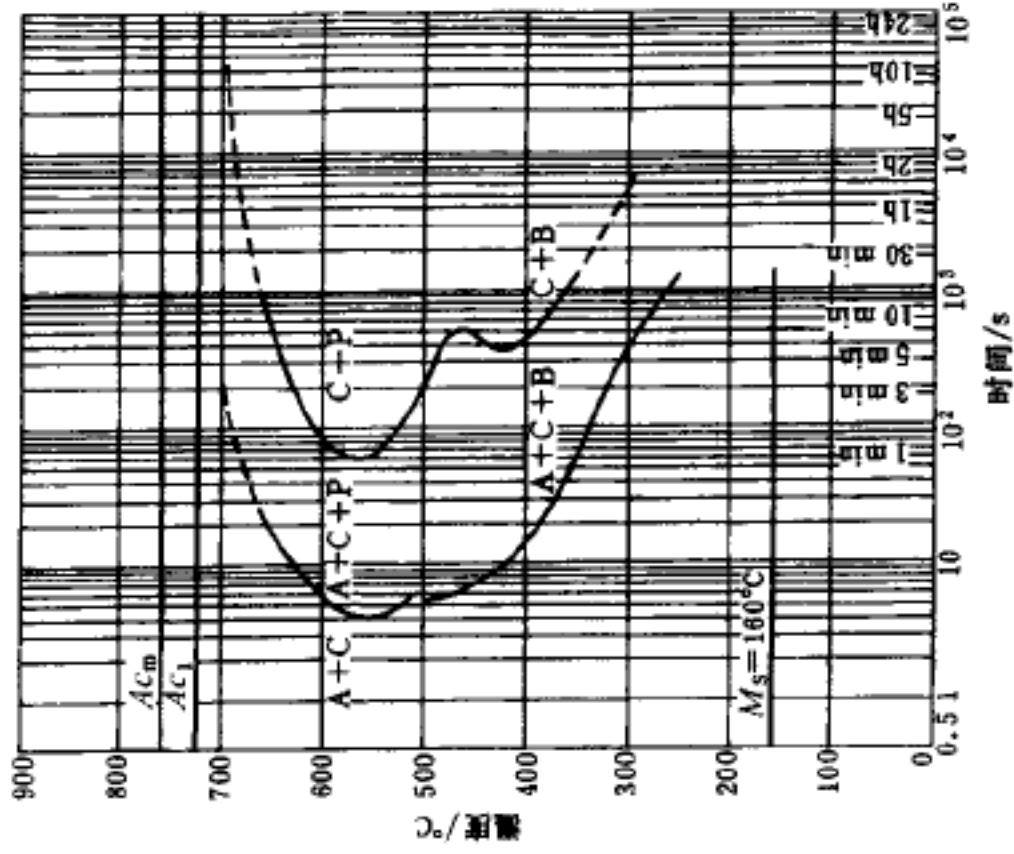
表图 5.1-45 GCr15 钢



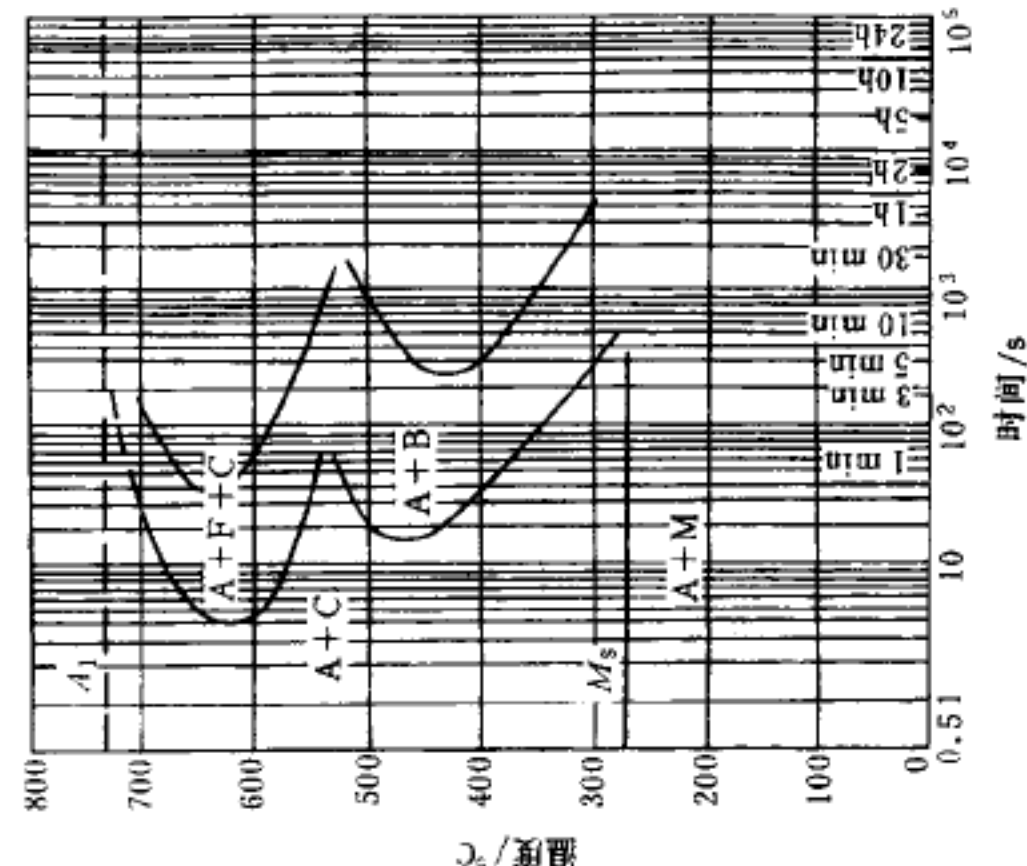
表图 5.1-48 T10 钢



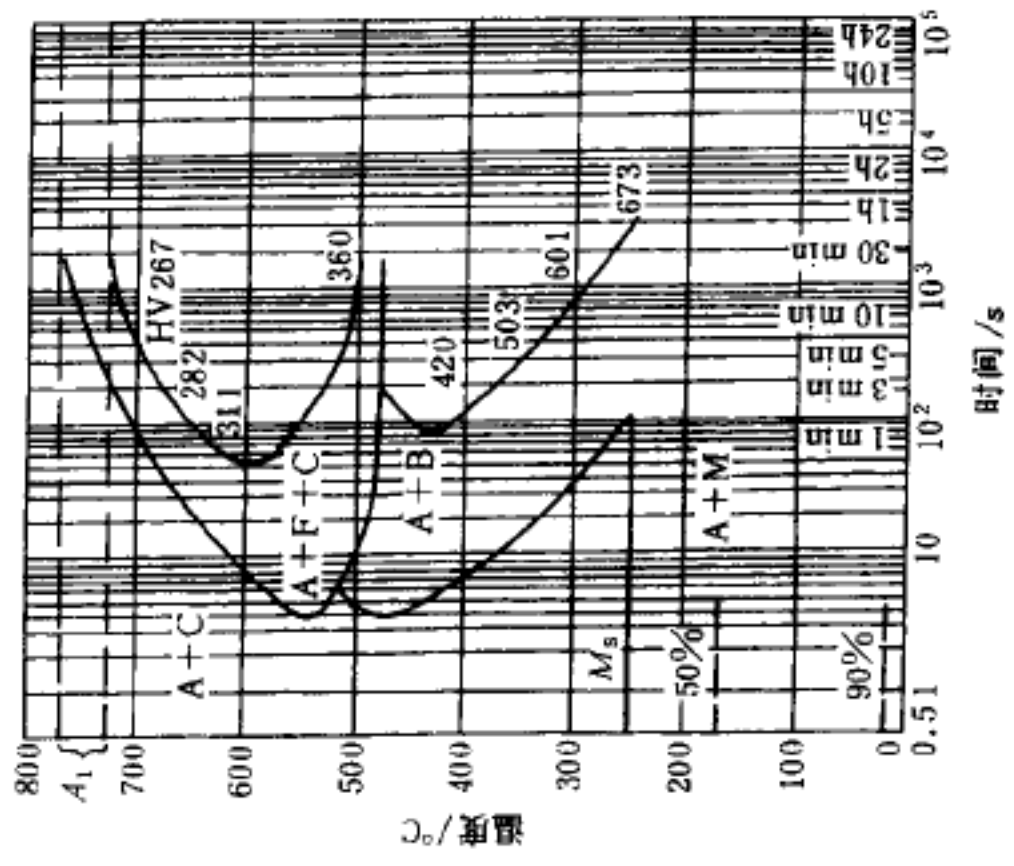
表图 5.1-49 Cr 钢



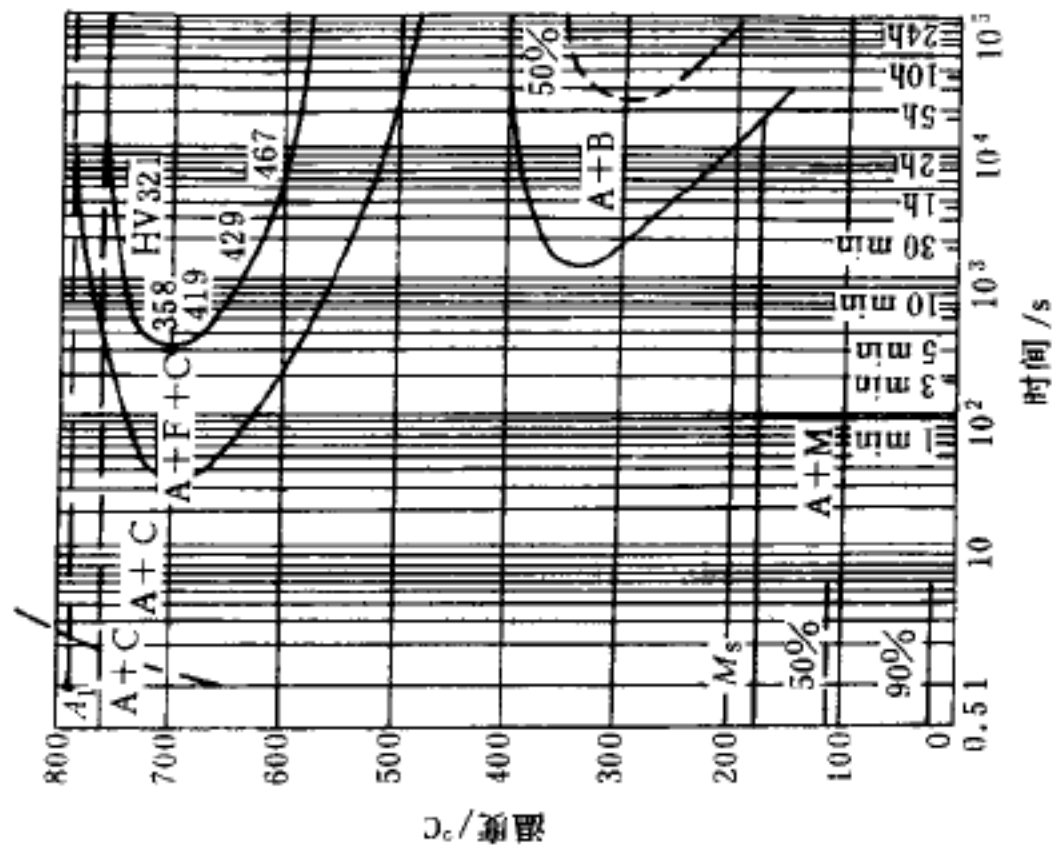
表图 5.1-52 9Mn2V 钢



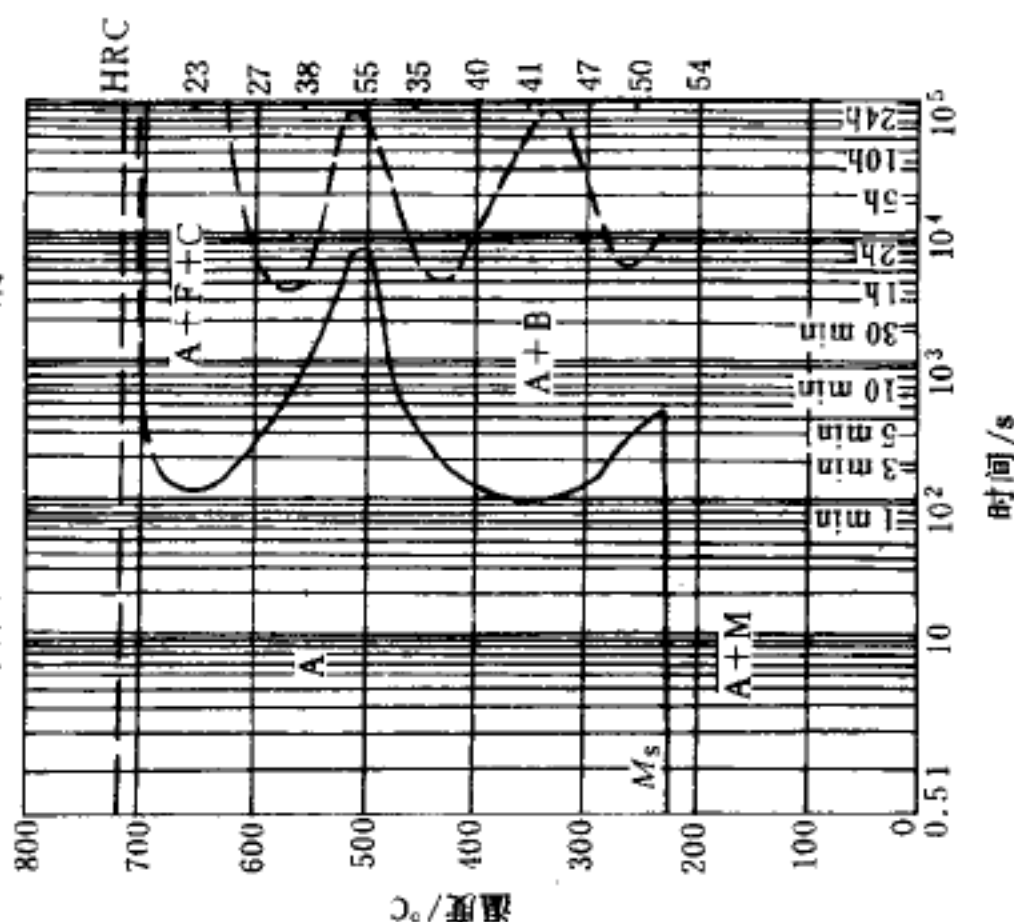
表图 5.1-50 9Cr2 钢



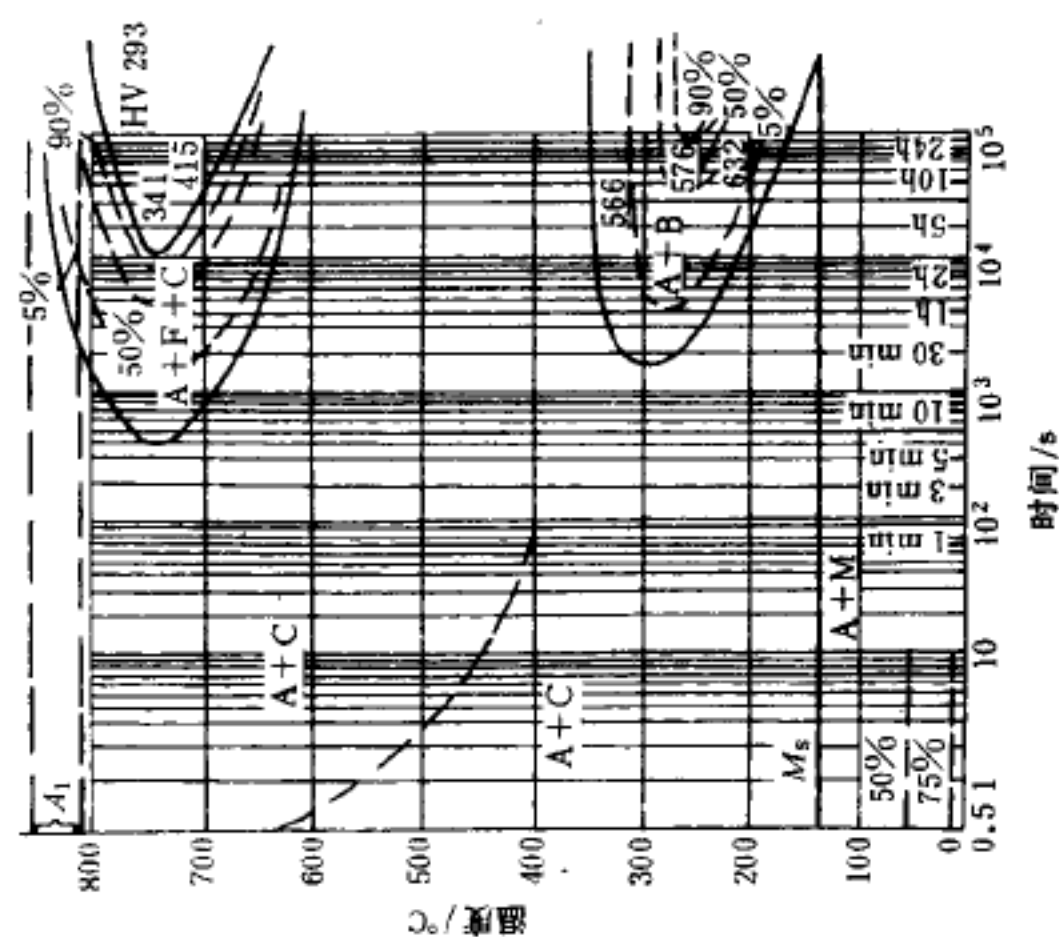
表图 5.1-53 CrW Mn 钢



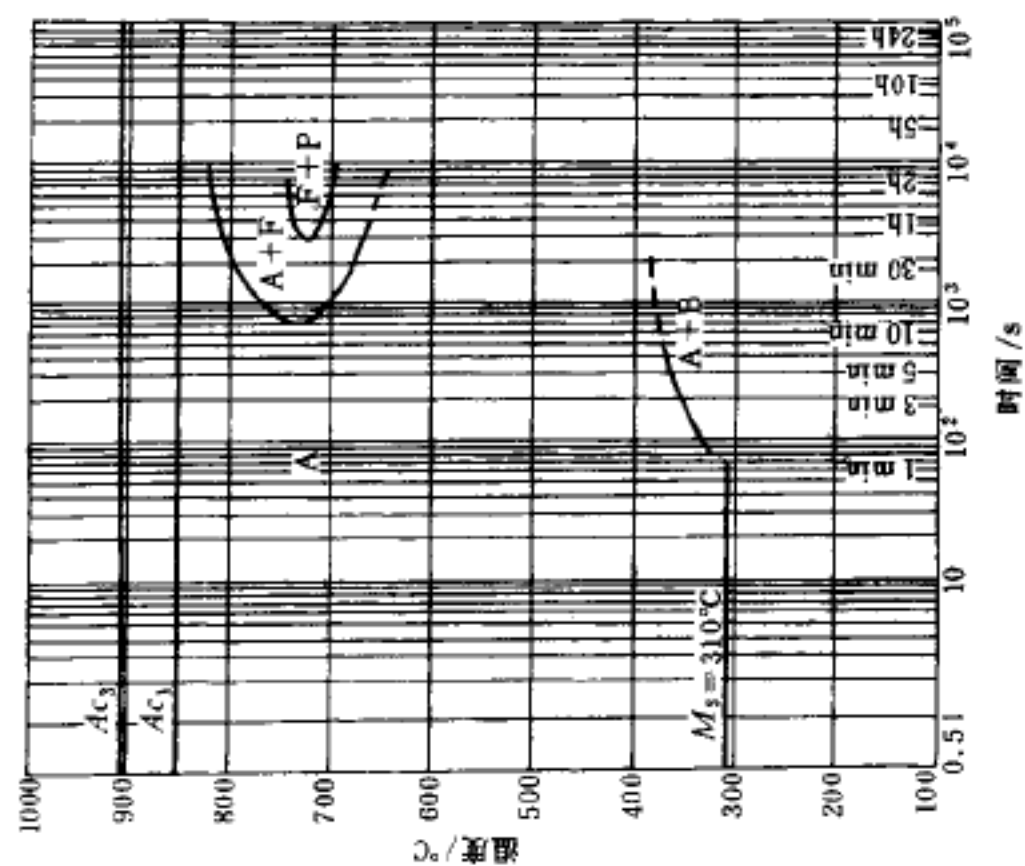
表图 5.1-51 Cr12 钢



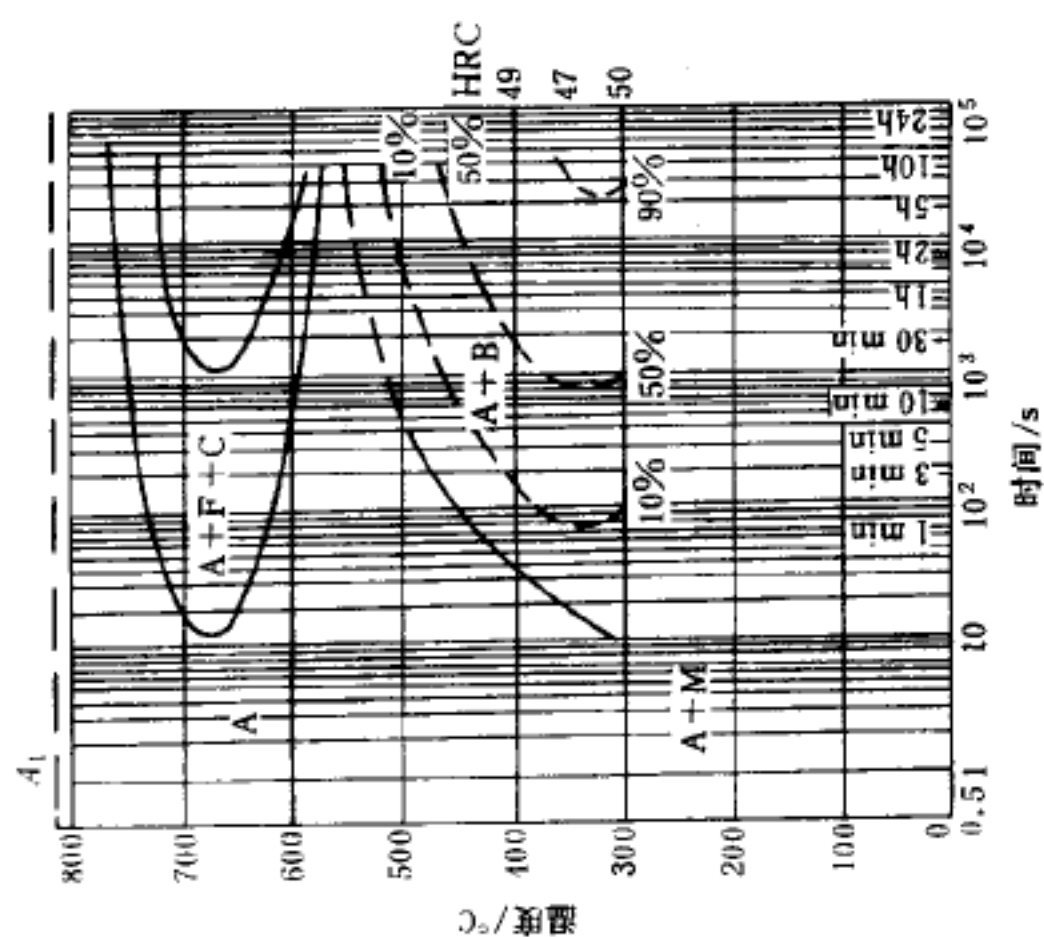
表图 5.1-54 5CrMnMo 钢



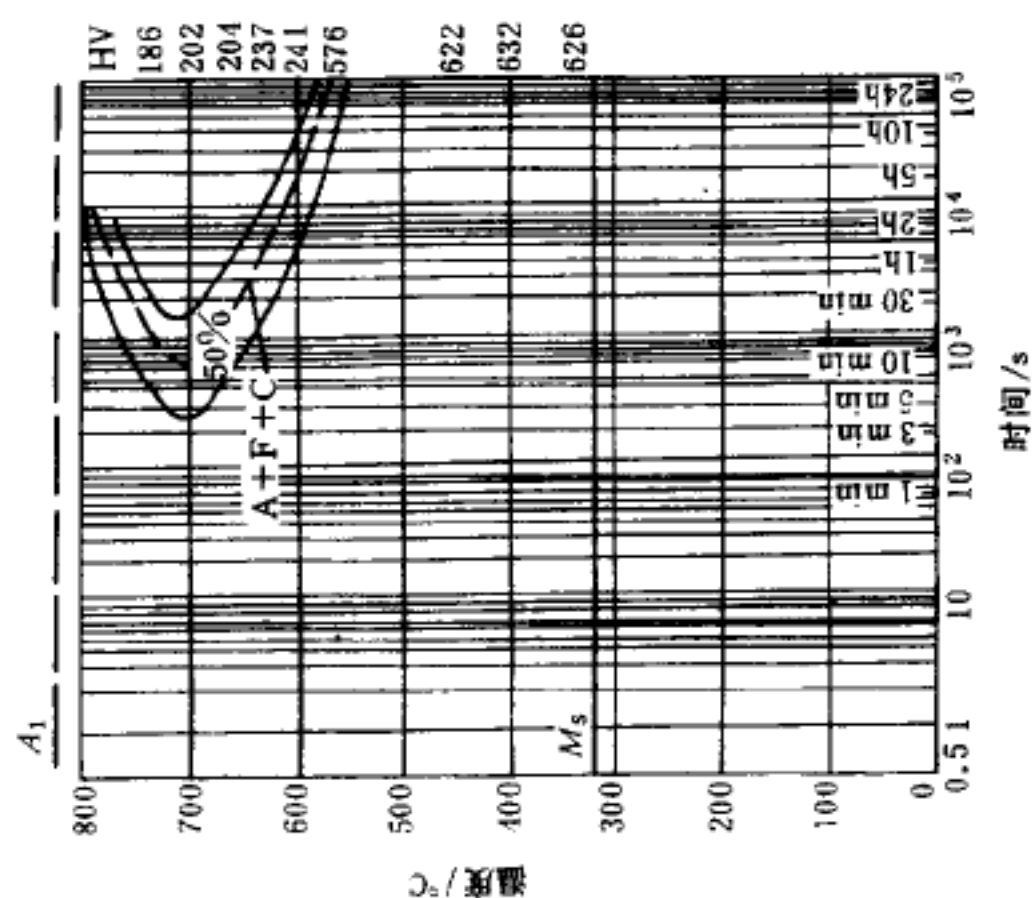
表图 5.1-57 W18Cr4V 钢



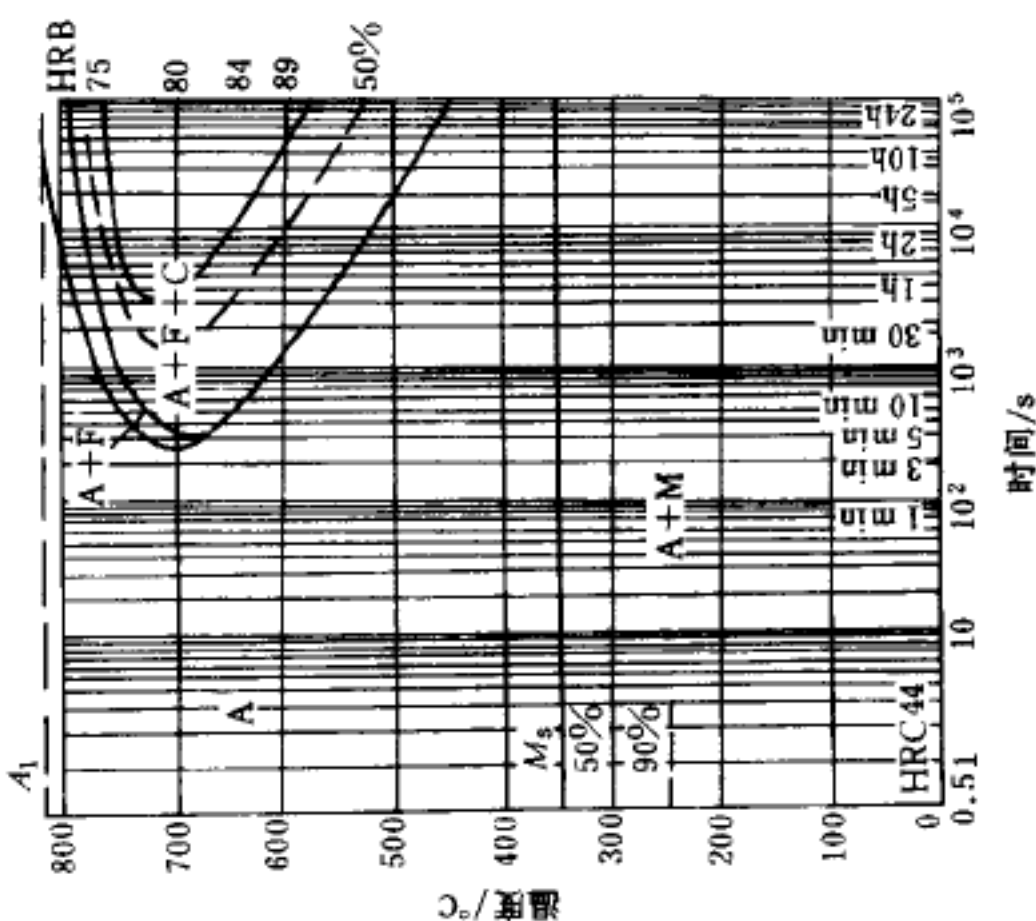
表图 5.1-56 4Cr5MoVSi 钢



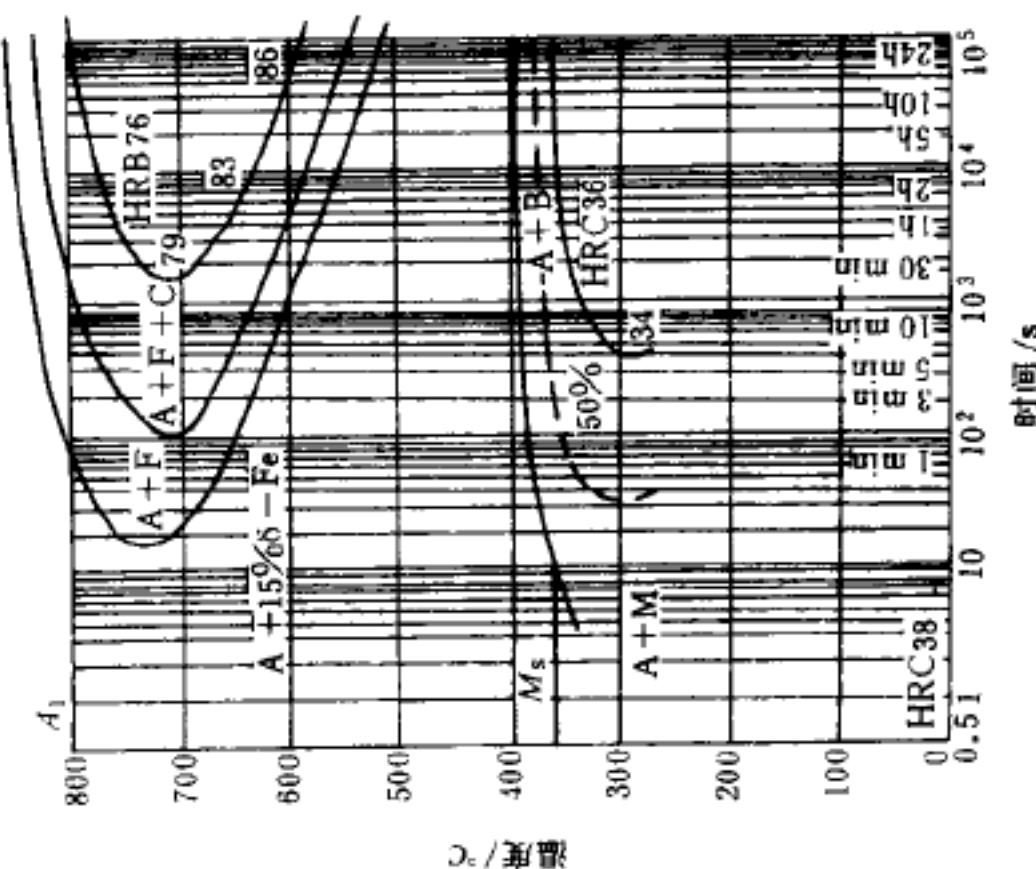
表图 5.1-55 3Cr2W8V 钢



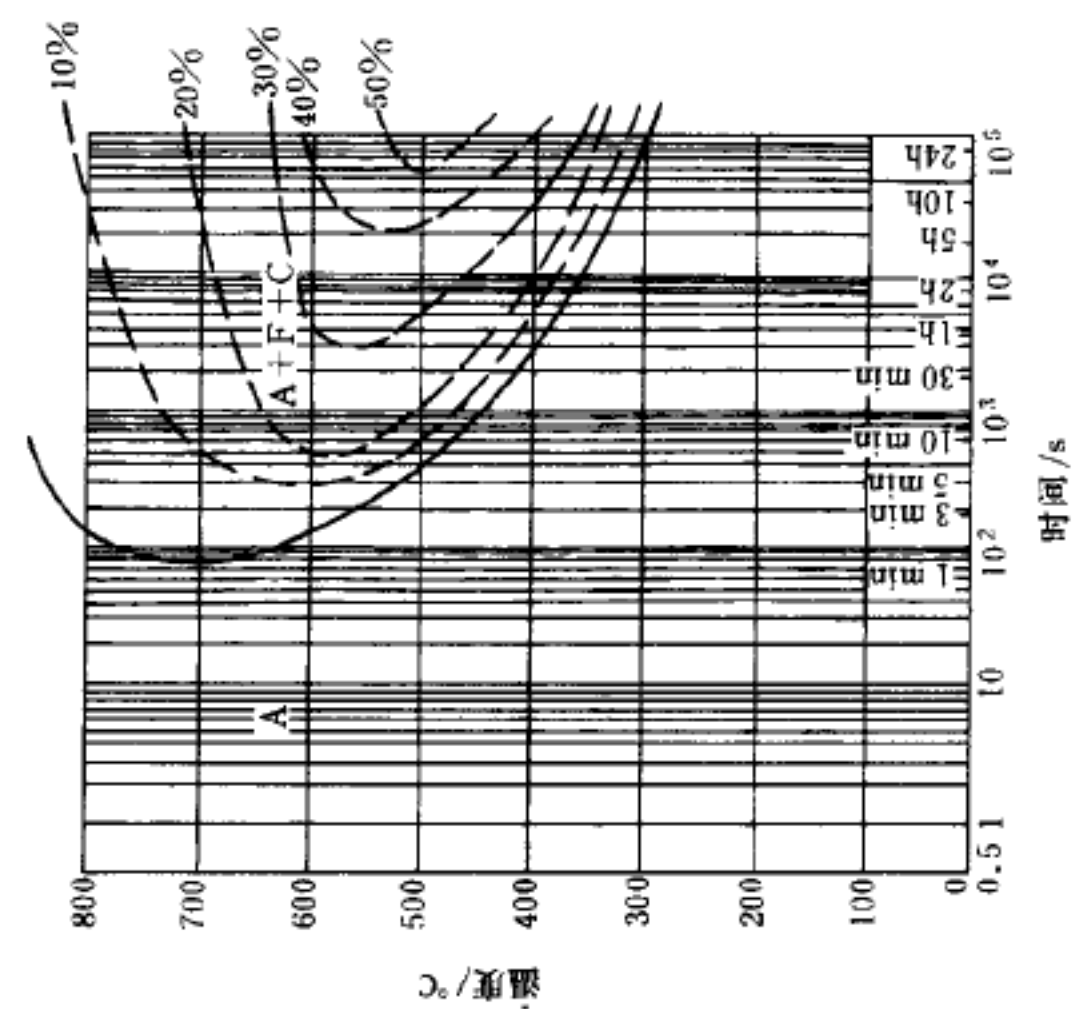
表图 5.1-60 2Cr13 钢



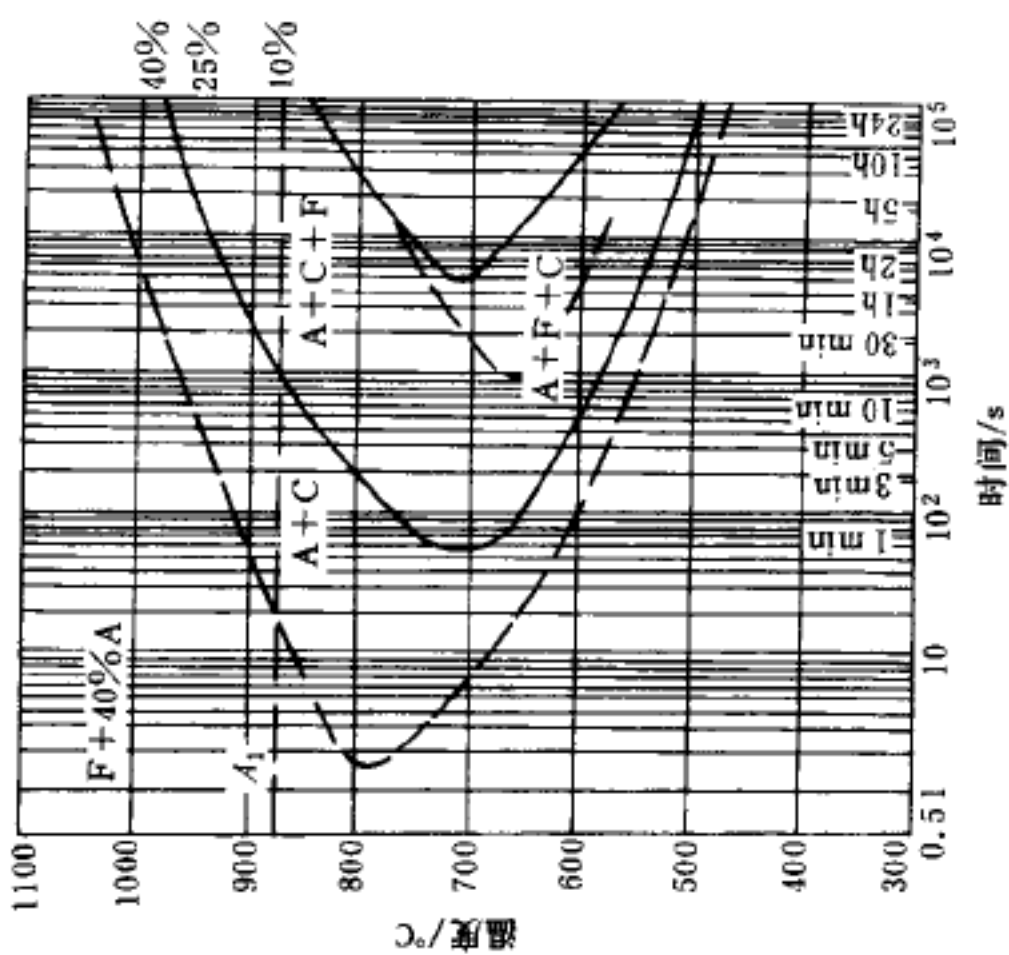
表图 5.1-59 1Cr13 钢



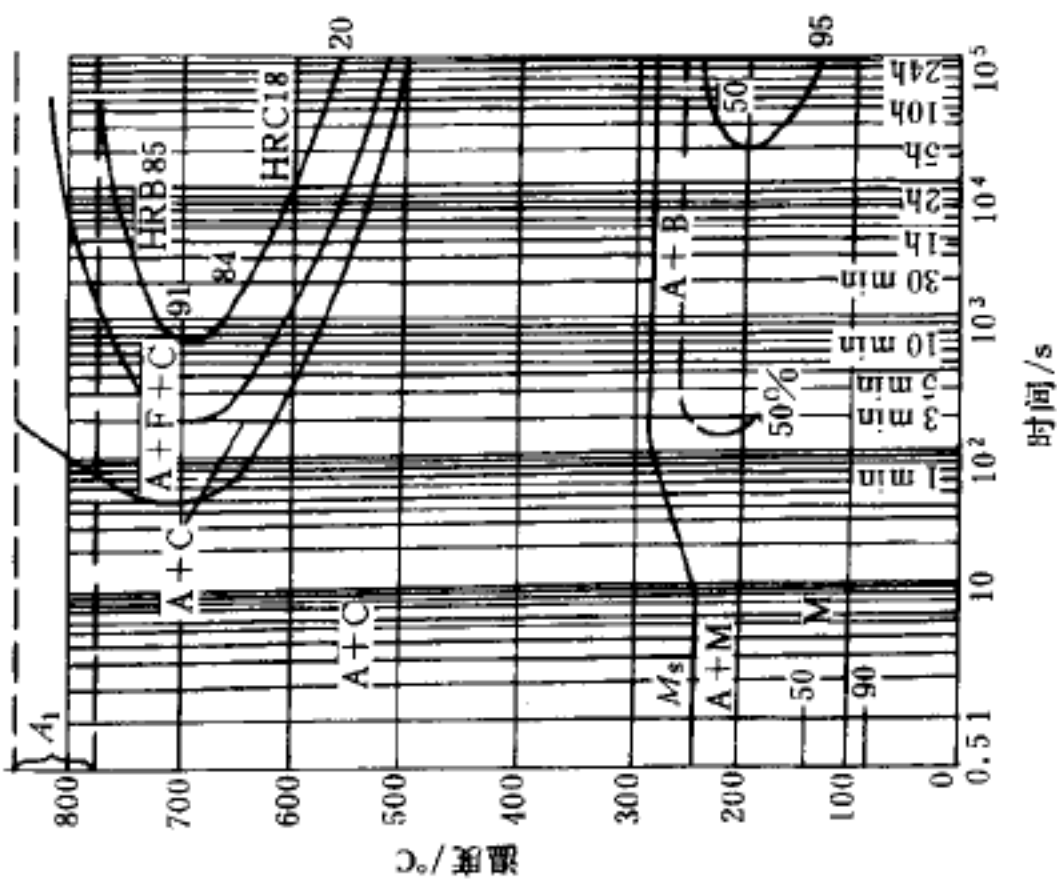
表图 5.1-58 0Cr13 钢



表图 5.1-63 Mn13 钢



表图 5.1-62 Cr17 钢



表图 5.1-61 3Cr13 钢

5.2 钢的过冷奥氏体连续冷却转变图(表 5-2, 表图 5.2-1 ~ 表图 5.2-40)

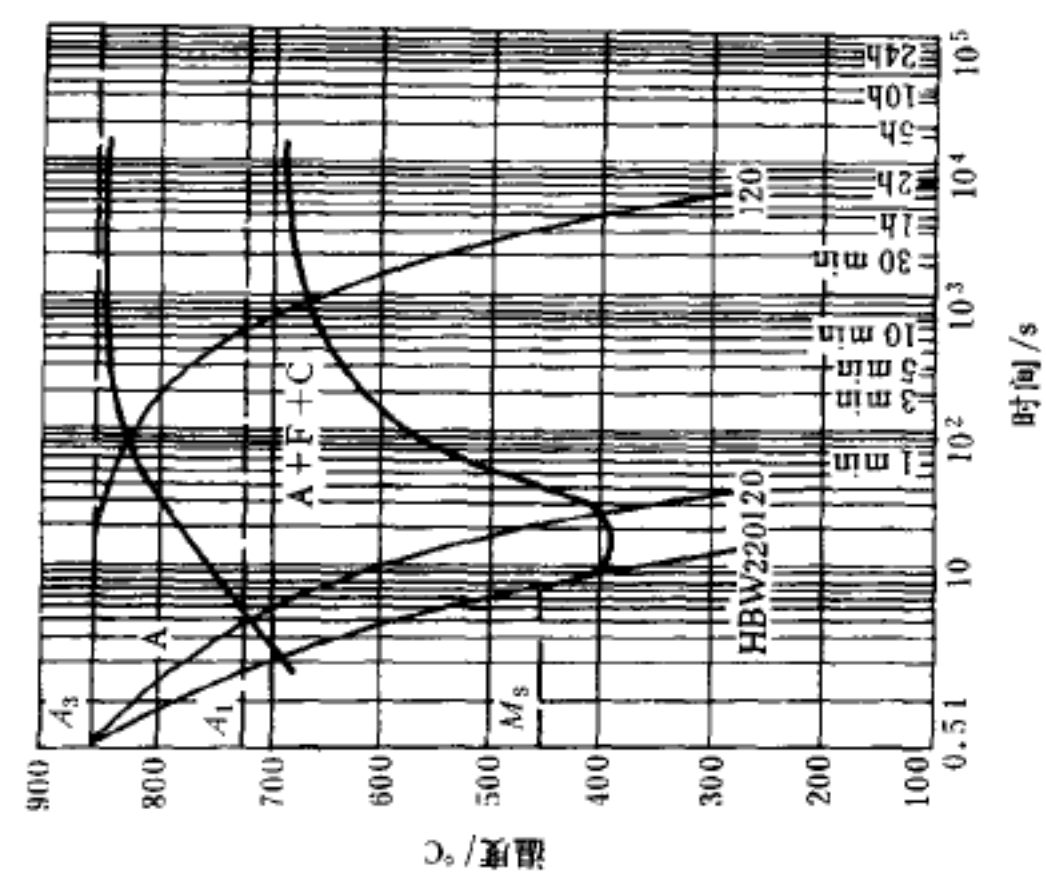
表 5-2 常用钢奥氏体连续冷却转变图

表图号	钢 号	化学成分(质量分数)(%)	状 态
表图 5.2-1	03 钢	C0.03, Si 微量, Mn 微量	奥氏体化温度 960℃, A_3 910℃
表图 5.2-2	15 钢	C0.13, Si0.26, Mn0.58, Cr0.07, Ni0.05, Mo0.01, V0.01, Cu0.20	奥氏体化温度 920℃, A_1 725℃, A_3 870℃, M_s 450℃
表图 5.2-3	20F 钢	C0.18, Si 微量, Mn0.49	奥氏体化温度 910℃, A_1 715℃, M_s 460℃
表图 5.2-4	35 钢	C0.33, Si0.25, Mn0.55, Cr0.14, S0.03, P0.032	奥氏体化温度 860℃, 时间 5min, A_c 735℃, A_c 815℃, M_s 370℃
表图 5.2-5	40 钢	C0.43, Si0.24, Mn0.68, Cr0.13, Ni0.25	奥氏体化温度 850℃, A_1 720℃, A_3 770℃, M_s 340℃
表图 5.2-6	45 钢	C0.44, Si0.22, Mn0.66, Cr0.15, V0.02	奥氏体化温度 880℃, A_1 735℃, A_3 785℃, M_s 350℃
表图 5.2-7	50 钢 ^①	C0.50, Si0.26, Mn0.58, Cr0.16, Ni0.18, S0.021, P0.018	奥氏体化温度 ① 1325℃ × 5.5s、② 1050℃ × 2min, A_c 735℃, A_c 785℃
表图 5.2-8	16Mn 钢	C0.15, Si0.50, Mn1.42, P0.016, S0.012	原态退火, 奥氏体化温度 900℃, 时间 5min
表图 5.2-9	16Mn 钢 ^①	C0.17, Si0.54, Mn1.39, S0.024, P0.025, Al0.069	奥氏体化温度 1300℃, A_1 735℃, A_3 865℃, M_s 430℃
表图 5.2-10	20Mn2 钢	C0.23, Si0.3, Mn1.64, Cr0.14, Ni0.20, Mo0.23	奥氏体化温度 ① 1350℃、② 900℃, A_c 720℃, A_c 830℃
表图 5.2-11	40Mn2 钢	C0.42, Si0.27, Mn1.82	奥氏体化温度 860℃, A_1 700℃, A_3 765℃, M_s 340℃
表图 5.2-12	40Cr 钢	C0.43, Si0.25, Mn0.67, P0.22, S0.004, Cr0.89	原态正火, 奥氏体化温度 850℃, 时间 10min
表图 5.2-13	35SiMn 钢	C0.38, Si1.05, Mn1.14, Cr0.23, V0.02	奥氏体化温度 860℃, A_1 735℃, A_3 795℃, M_s 330℃
表图 5.2-14	35CrMo 钢	C0.38, Si0.23, Mn0.64, Cr0.99, Ni0.08, Mo0.16	奥氏体化温度 860℃, A_1 730℃, A_3 780℃, M_s 370℃
表图 5.2-15	45CrMn 钢	C0.46, Si0.22, Mn0.50, Cr1.00, Ni0.22, Mo0.27	奥氏体化温度 1050℃, 时间 10min, A_1 725℃, A_3 760℃, M_s 280℃
表图 5.2-16	50CrMo 钢	C0.50, Si0.32, Mn0.80, Cr1.04, Ni0.11, Mo0.24	奥氏体化温度 850℃, A_1 725℃, A_3 760℃, M_s 290℃
表图 5.2-17	20CrNi 钢 ^①	C0.18, Si0.29, Mn0.86, Cr0.57, Ni0.87, Mo0.48, Cu0.29	奥氏体化温度 1300℃, A_1 725℃, A_3 865℃, M_s 415℃
表图 5.2-18	40CrNi 钢	C0.40, Si0.27, Mn0.66, Cr0.63, Ni0.99	奥氏体化温度 850℃, A_1 730℃, A_3 770℃, M_s 305℃
表图 5.2-19	12CrNi3 钢	C0.13, Si0.34, Mn0.50, P0.013, S0.004, Cr0.76, Ni2.92	原态正火 + 回火, 奥氏体化温度 860℃, 时间 10min
表图 5.2-20	18CrNi2 钢	C0.16, Si0.31, Mn0.50, Cr1.95, Ni2.02, Mo0.03, V0.01	奥氏体化温度 870℃, 时间 10min, A_c 735℃, A_c 790℃, M_s 450℃
表图 5.2-21	18CrNi2 钢 ^① (渗 C 后)	C0.9, Si0.31, Mn0.50, Cr1.95, Ni2.02, Mo0.03, S0.014, P0.013	奥氏体化温度 830℃, 时间 15min, M_s 160℃
表图 5.2-22	20Cr2Ni4A 钢	C0.17, Si0.31, Mn0.51, P0.021, S0.005, Cr1.57, Ni3.45, Mo0.25, Cu0.12	原态正火 + 高温回火, 奥氏体化温度 880℃, 时间 10min
表图 5.2-23	14MnVTiRE 钢	C0.14, Si0.48, Mn1.52, P0.011, S0.004, V0.071, Ti0.72, Cu 微量, RE0.16	原态正火, 奥氏体化温度 920℃, 时间 10min, 晶粒度 8

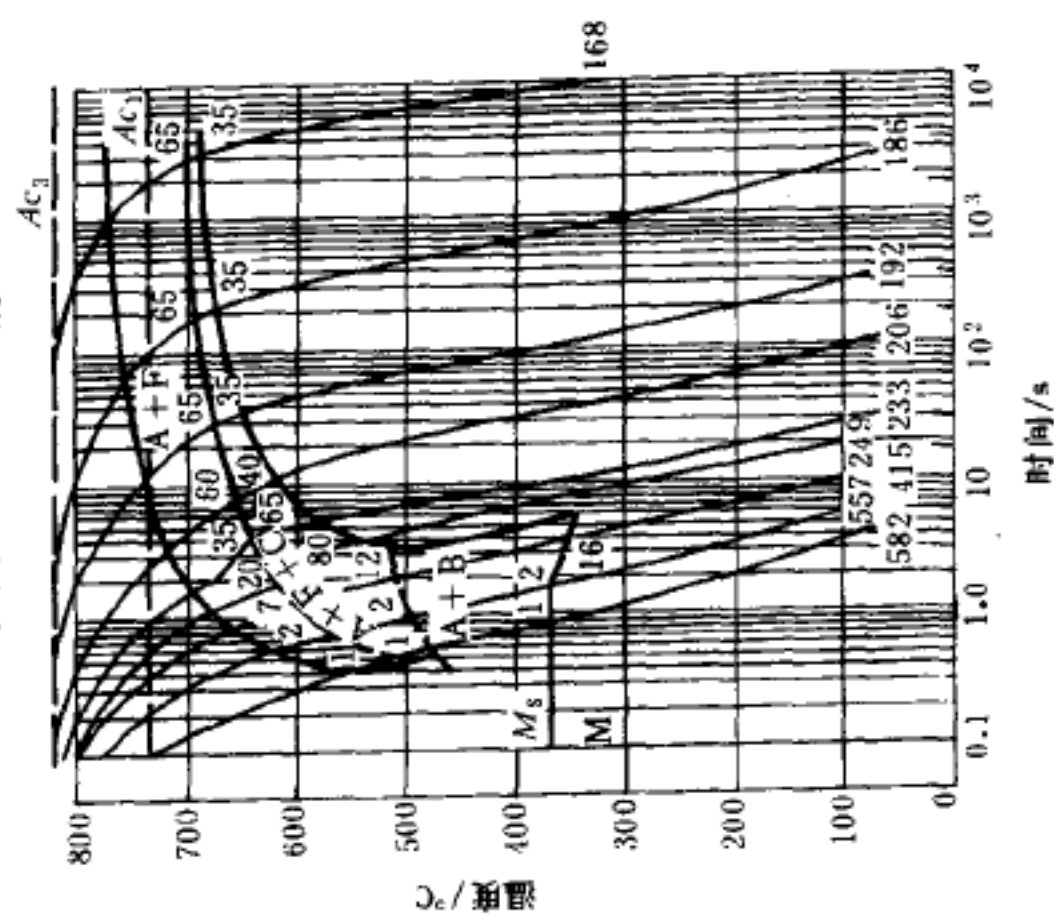
(续)

表图号	钢 号	化学成分(质量分数)(%)	状 态
表图 5.2-24	20Mn2TiB 图	C0.20, Si0.32, Mn1.63, P0.014, S0.005, Cr0.15, Ni0.12, Ti0.085, B0.0028	原态正火 + 高温回火, 奥氏体化温度 900℃, 时间 10min, 晶粒度 4~5
表图 5.2-25	25Cr2MoVA 钢	C0.23, Si0.30, Mn0.53, P0.018, Cr1.55, Ni0.03, Mo0.29, V0.21, Cu0.11	原态正火 + 回火, 奥氏体化温度 940℃, 时间 10min
表图 5.2-26	38CrMoAlA 钢	C0.38, Si0.42, Mn0.46, Cr1.38, Mo0.23, Al0.82	原态正火 + 回火, 奥氏体化温度 930℃, 时间 20min
表图 5.2-27	35CrMnSiA 钢	C0.35, Si1.18, Mn0.98, P0.019, S0.007, Cr1.27, Ni0.05, Cu0.09	原态正火 + 回火, 奥氏体化温度 880℃, 时间 10min
表图 5.2-28	40CrNiMo 钢	C0.41, Si0.31, Mn0.80, P0.005, S0.02, Cr0.87, Ni1.82, Mo0.29	原态退火, 奥氏体化温度 850℃, 时间 15min, 晶粒度 7
表图 5.2-29	30Cr2Ni2Mo 钢	C0.30, Si0.24, Mn0.46, Cr1.44, Ni2.06, Mo0.37, Cr0.20	奥氏体化温度 850℃, A ₁ 740℃, A ₃ 780℃, M _s 350℃
表图 5.2-30	弹 簧 钢 65 钢	C0.66, Si0.21, Mn0.57	奥氏体化温度 815℃, A ₁ 715℃, M _s 300℃
表图 5.2-31	轴 承 钢 GCr15 钢	C1.04, Si0.26, Mn0.33, Cr1.53, Ni0.31, Mo0.01, V0.01, Cu0.20	奥氏体化温度 860℃, A ₁ 750℃, A ₁ 795℃, M _s 245℃
表图 5.2-32	GCr15SiMn 钢 工 模 具 钢	C0.99, Si0.55, Mn1.0, Cr1.45	奥氏体化温度 850℃, A ₁ 740℃, M _s 200℃
表图 5.2-33	T8 钢	C0.76, Si0.22, Mn0.29, Cr0.11, Ni0.07, Mo0.02, V0.02, Cu0.11	奥氏体化温度 810℃, A ₁ 720℃, A ₃ 740℃, M _s 245℃
表图 5.2-34	T10 钢	C1.03, Si0.17, Mn0.22, Cr0.07, Ni0.10, Mo0.01, Cu0.14	奥氏体化温度 860℃, A ₁ 717℃, A ₁ 736℃, M _s 160℃
表图 5.2-35	5CrMnMo 钢	C0.53, Si0.38, Mn1.53, Cr0.76, Ni0.30, Mo0.17	奥氏体化温度 900℃, A ₁ 745℃, M _s 250℃
表图 5.2-36	3Cr2W8V 钢	C0.28, Si0.10, Mn0.36, W8.88, Cr2.57, Mo0.03, V0.36, Ni0.04	奥氏体化温度 1120℃, A ₁ 820℃, A ₁ 925℃, M _s 420℃
表图 5.2-37	4Cr5MoVSi 钢 不 锈 耐 热 钢	C0.40, Si1.00, Mn0.60, S0.003, P0.01, Cr5.00, Mo1.30, V0.40	原态退火, 奥氏体化温度 1000℃, 时间 10min
表图 5.2-38	3Cr13 钢	C0.25, Si0.37, Mn0.29, Cr13.4, Ni0.13	奥氏体化温度 980℃, A ₁ 790℃, A ₁ 840℃, M _s 840℃
表图 5.2-39	4Cr13 钢 高 锰 钢	C0.44, Si0.30, Mn0.20, Cr13.12, Ni0.31, Mo0.01, V0.02, Cu0.09	奥氏体化温度 980℃, A ₁ 790℃, A ₁ 850℃, M _s 270℃
表图 5.2-40	Mn13 钢	C1.29, Mn13.3, Cr0.08	奥氏体化温度 1050℃

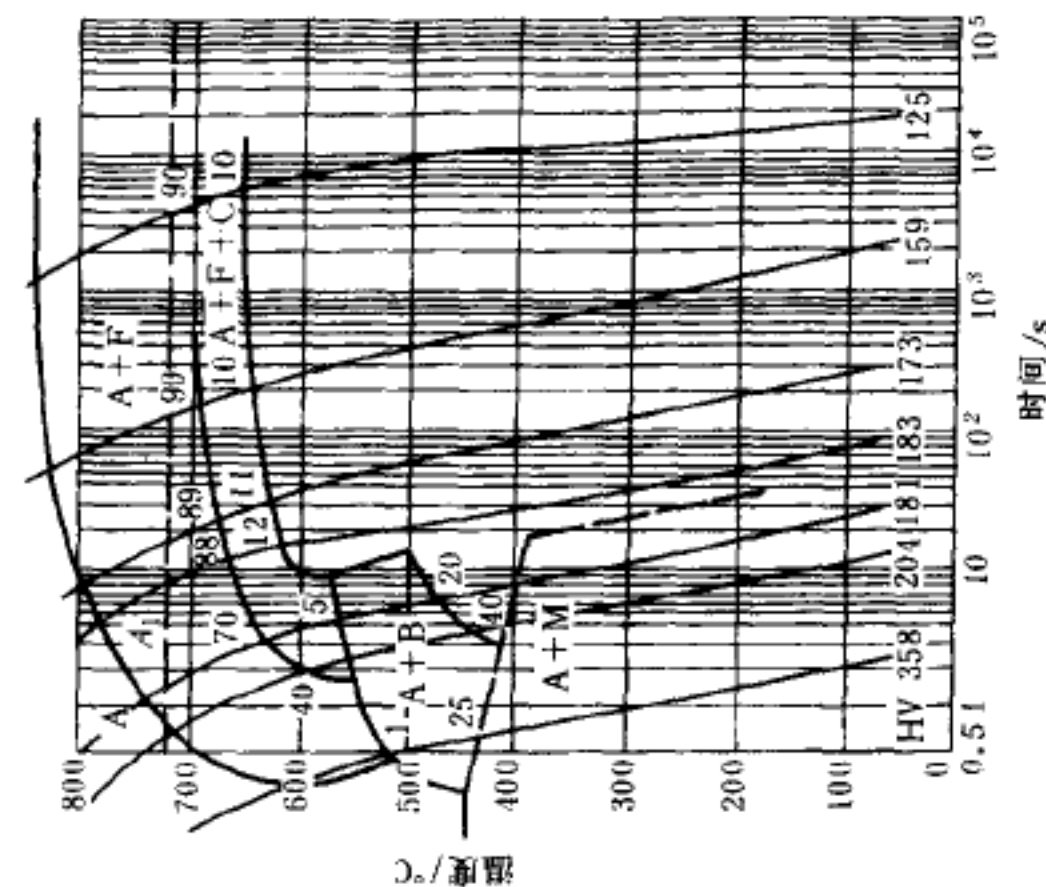
① 为高温快速加热, 供焊接时参阅。



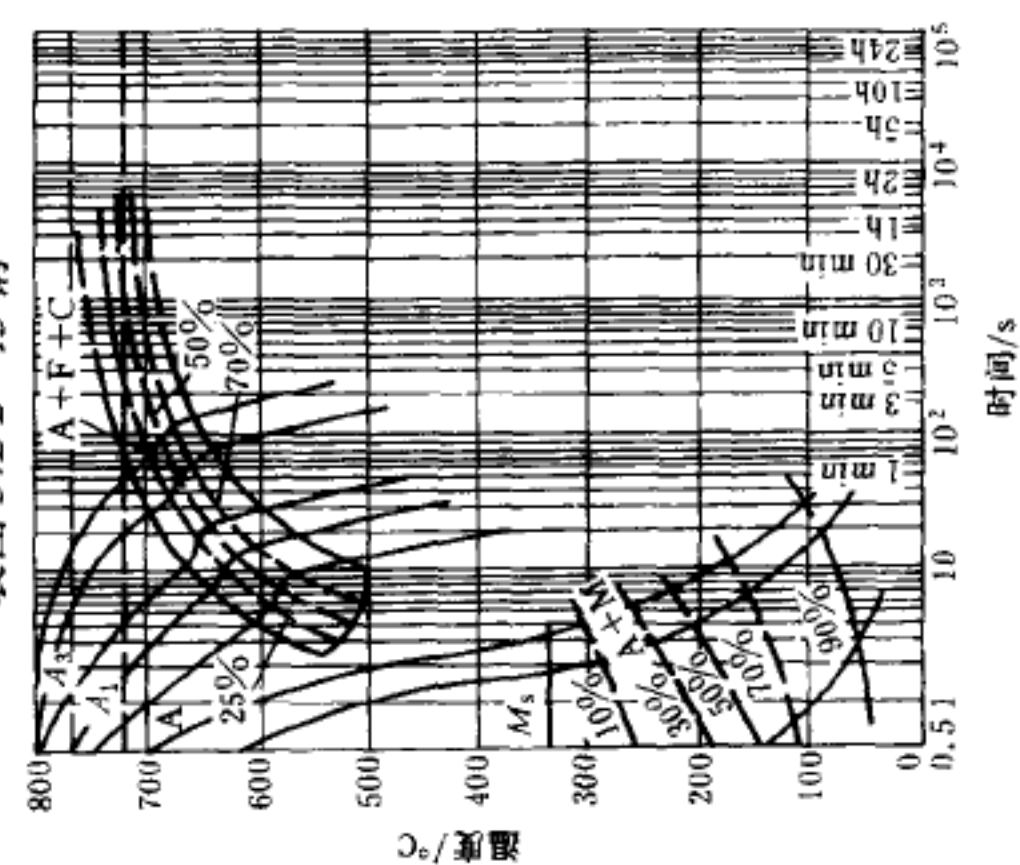
表图 5.2-1 03 钢



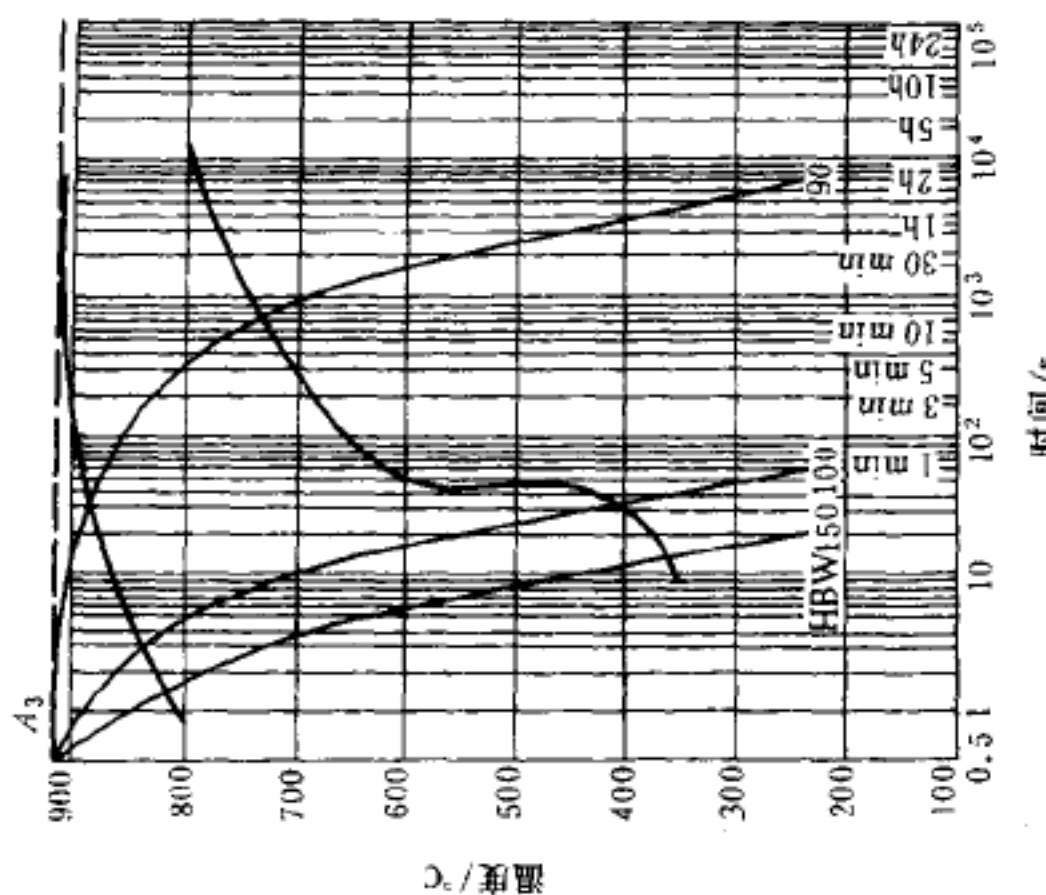
表图 5.2-2 15 钢



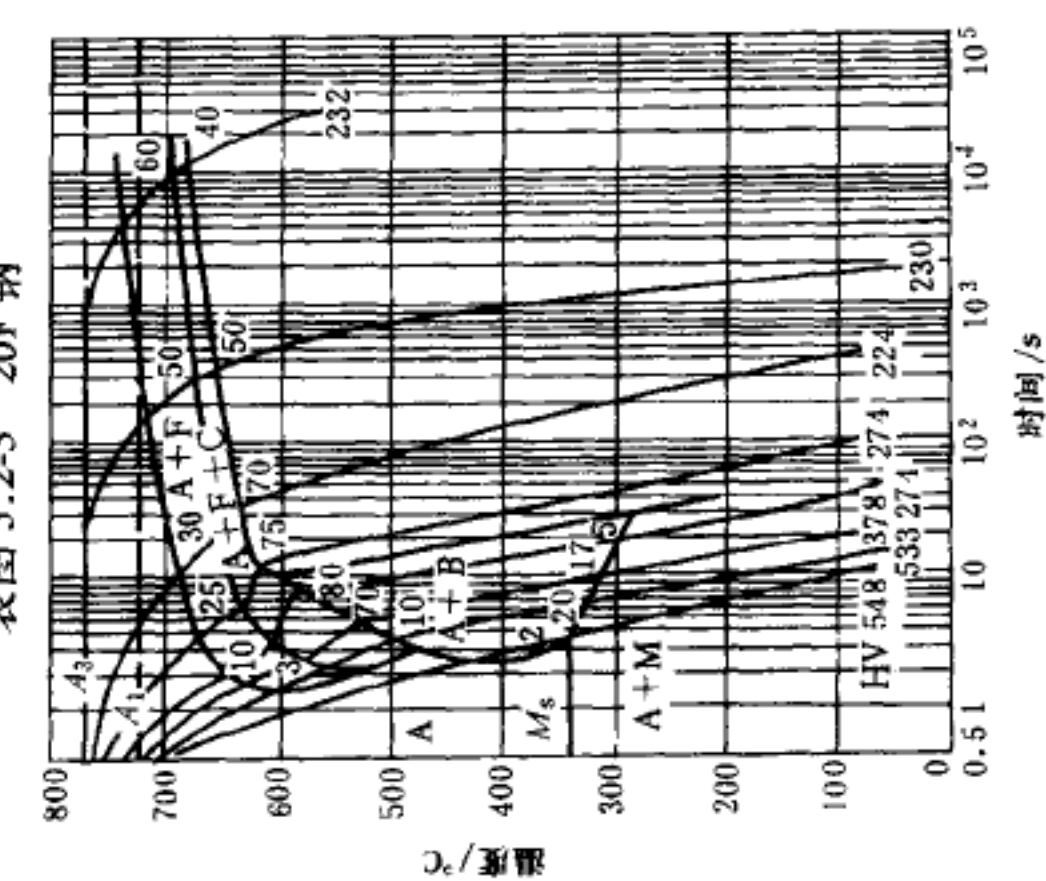
表图 5.2-3 20F 钢



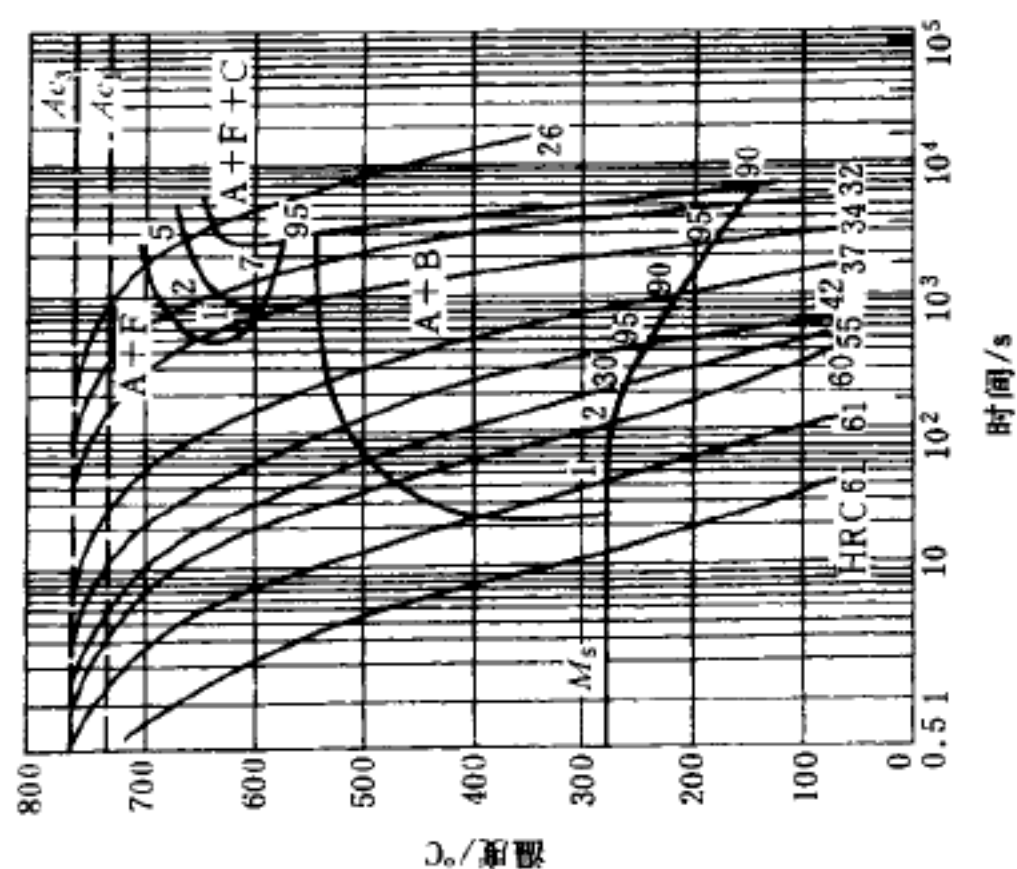
表图 5.2-4 35 钢



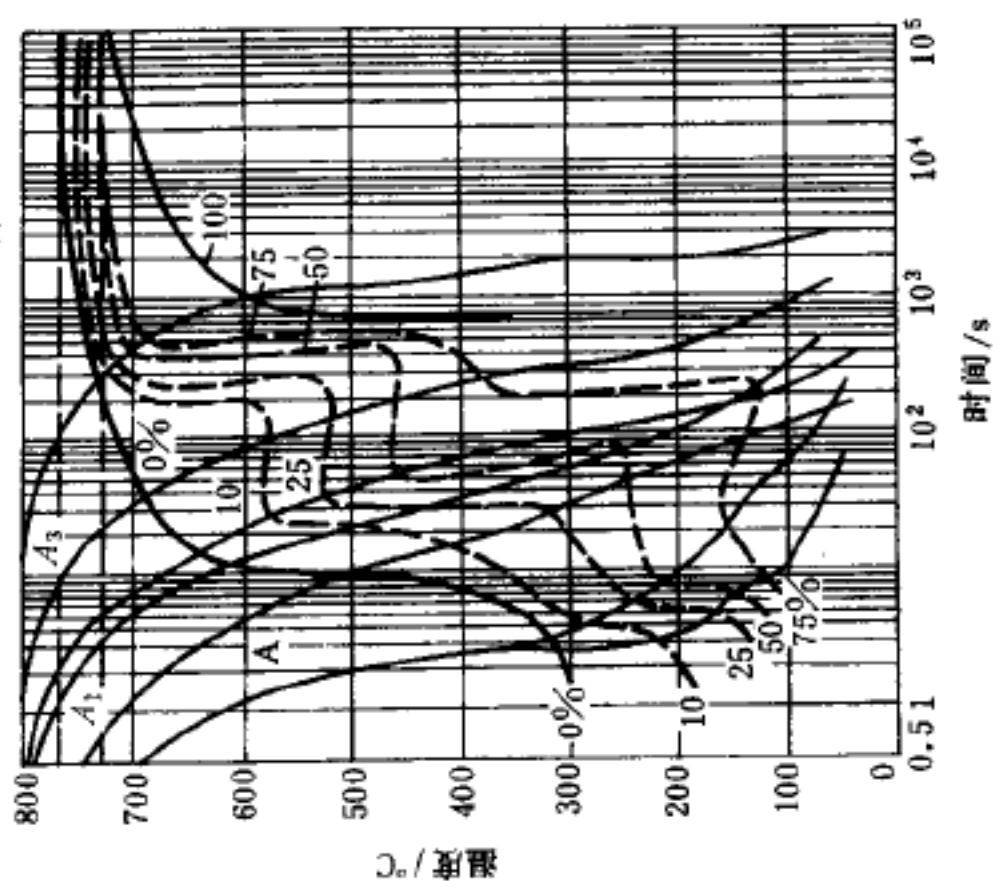
表图 5.2-5 40 钢



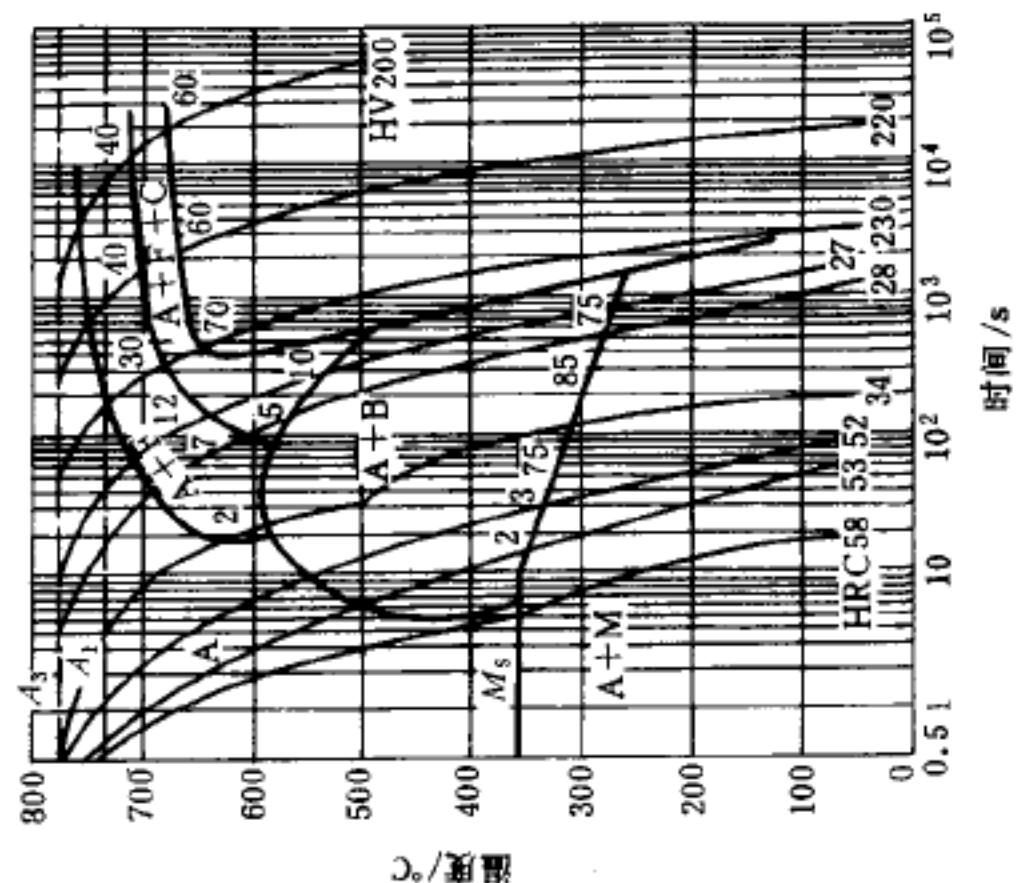
表图 5.2-6 45 钢



表图 5.2-15 45CrMo 钢

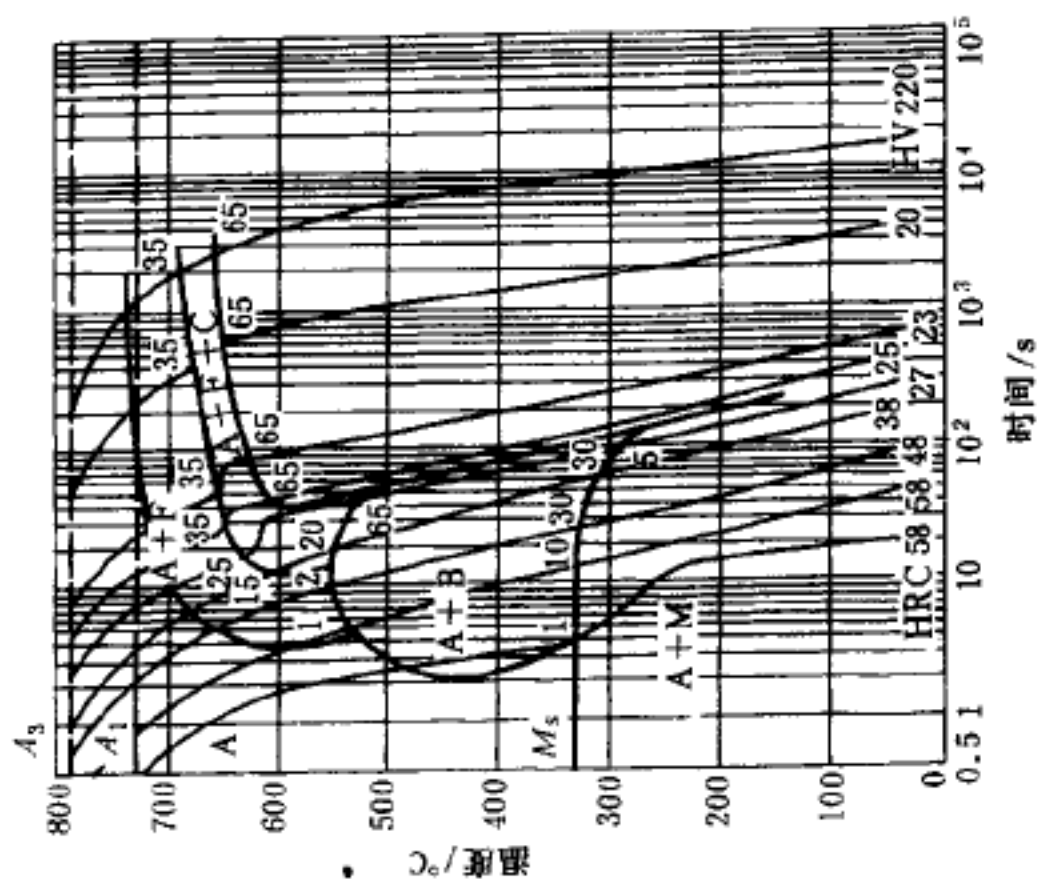
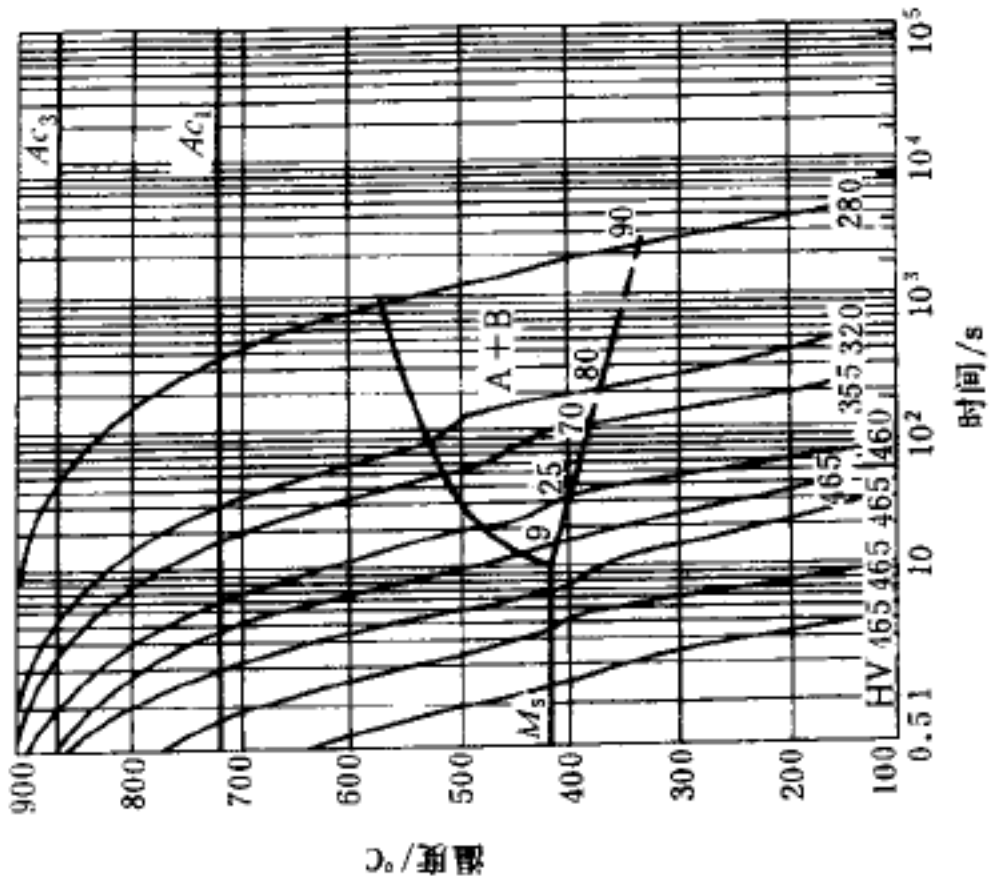


表图 5.2-16 50CrMo 钢

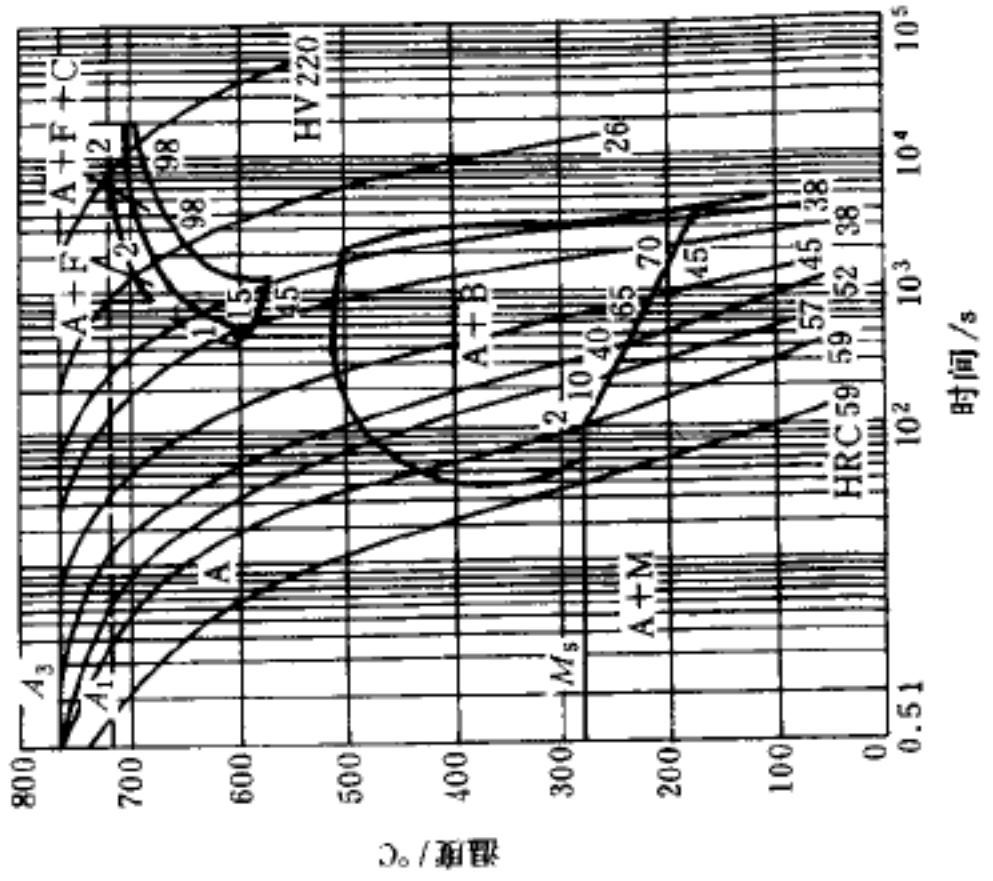


表图 5.2-17 20CrNi 钢^①

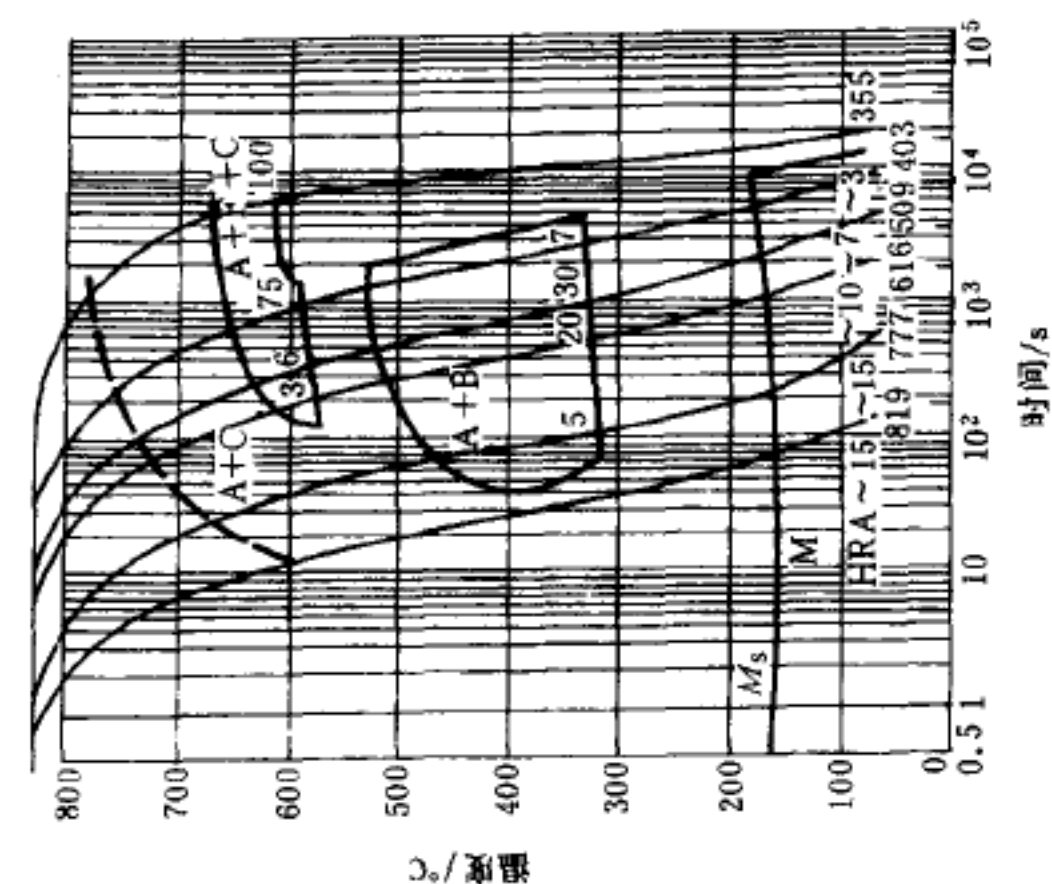
表图 5.2-14 35CrMo 钢



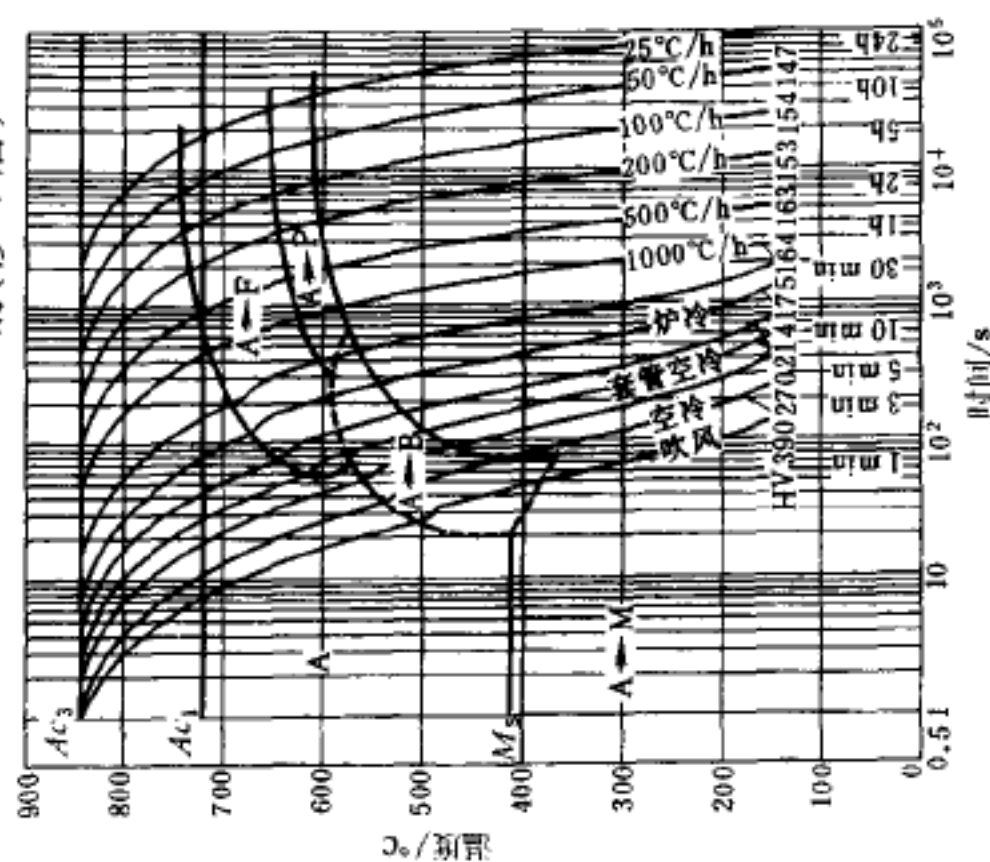
表图 5.2-13 35SiMn 钢



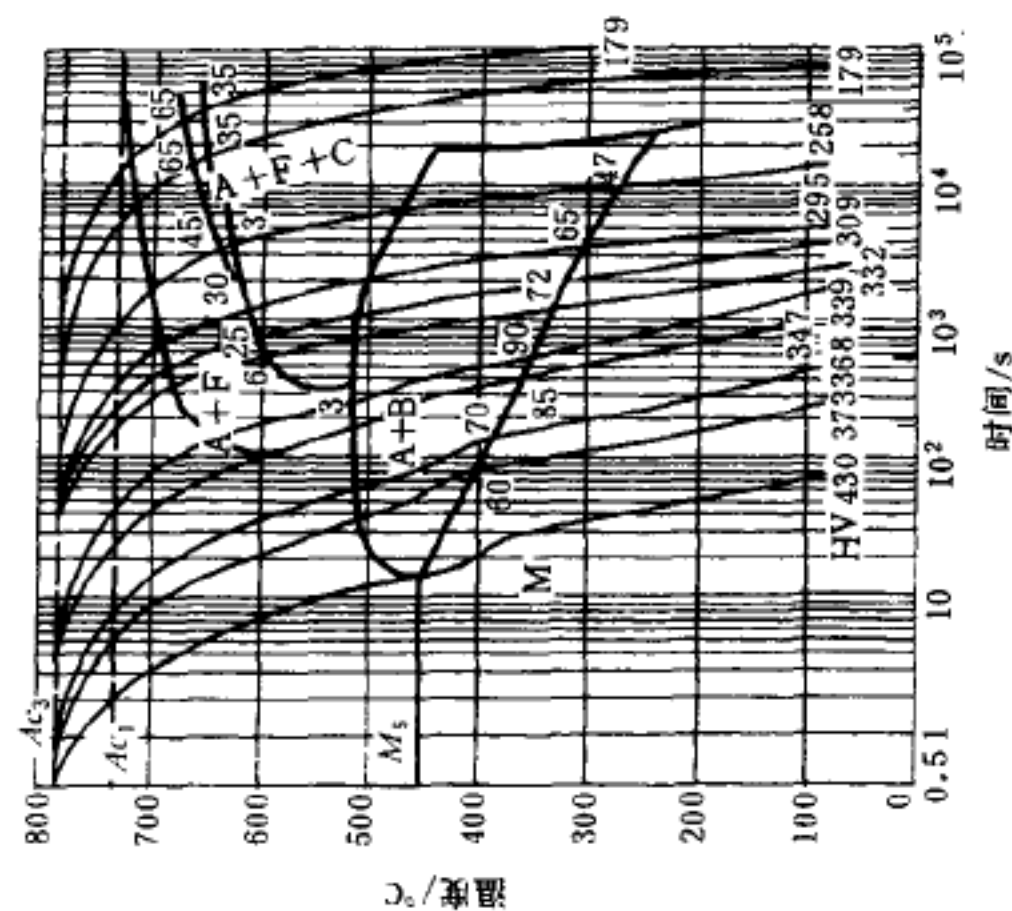
表图 5.2-16 50CrMo 钢



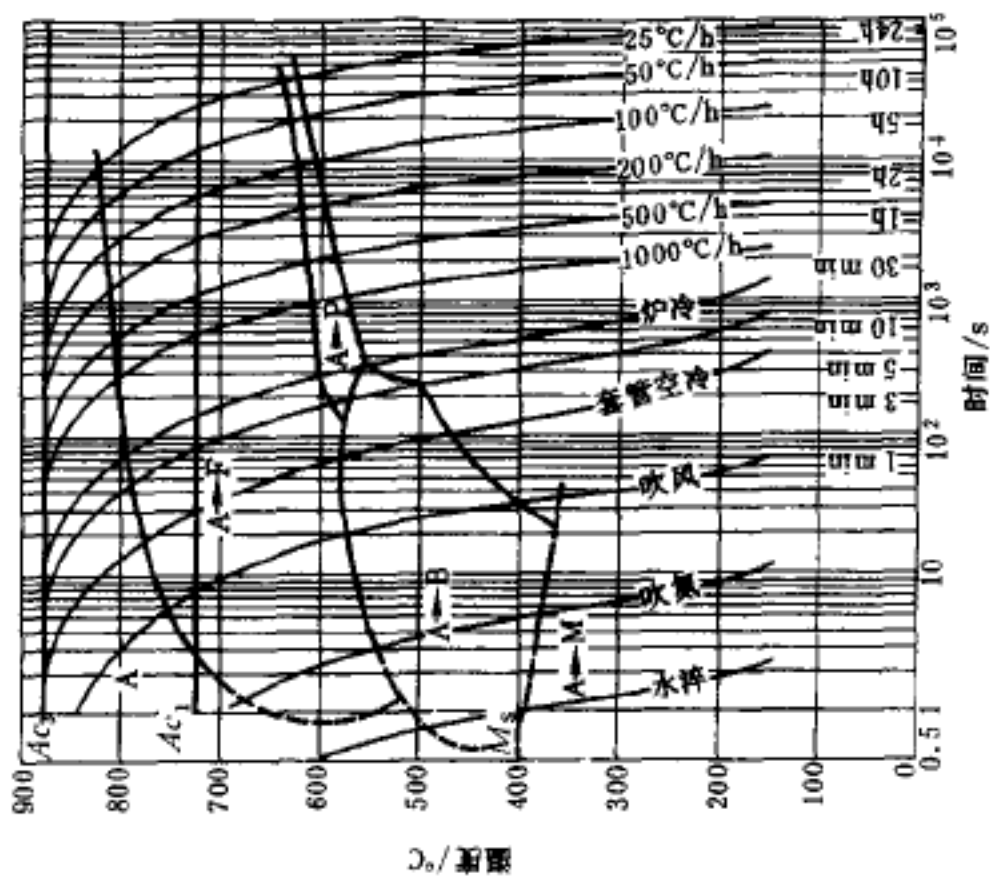
表图 5.2-21 18CrNi2 钢(渗 C 后)



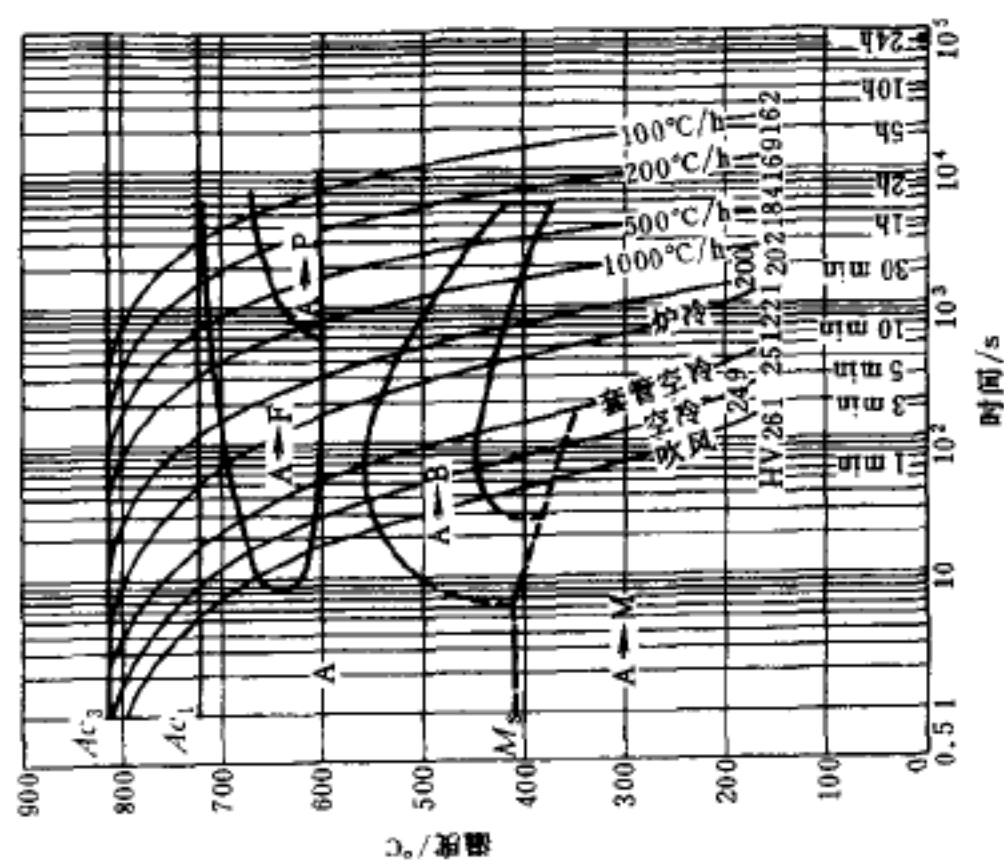
表图 5.2-24 20Mn2TiB 钢



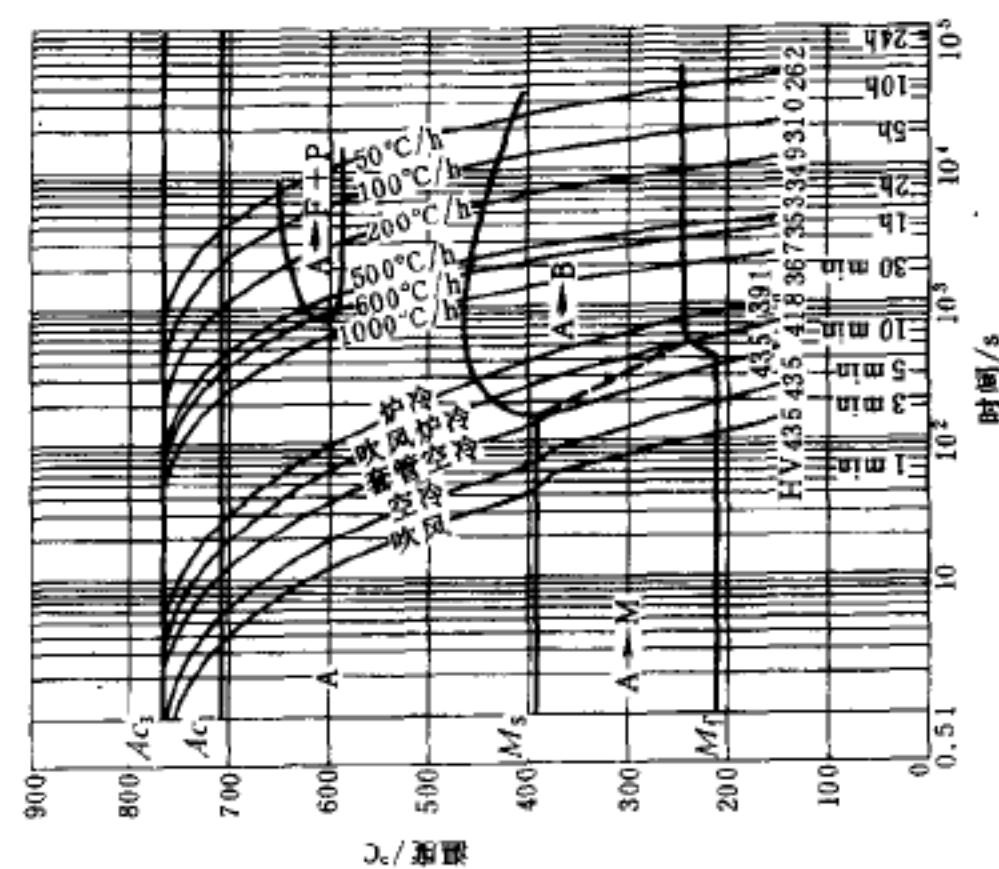
表图 5.2-20 18CrNi2 钢



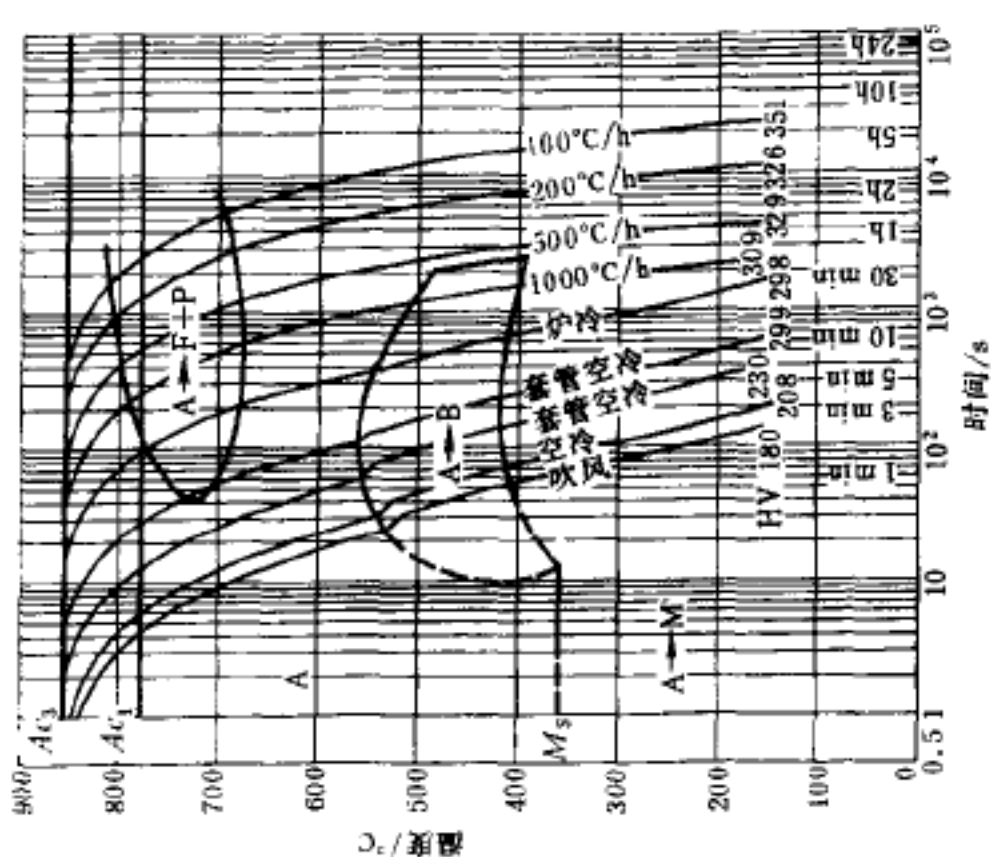
表图 5.2-23 14MnVTiRE 钢



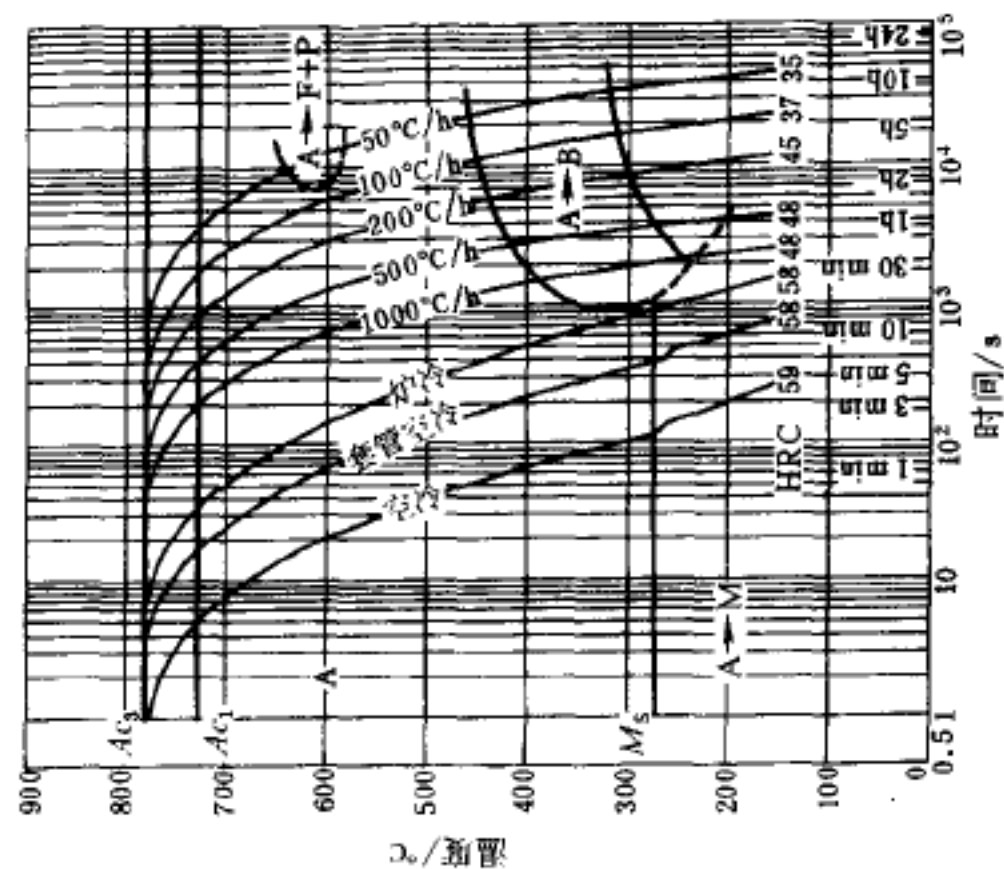
表图 5.2-19 12CrNi3 钢



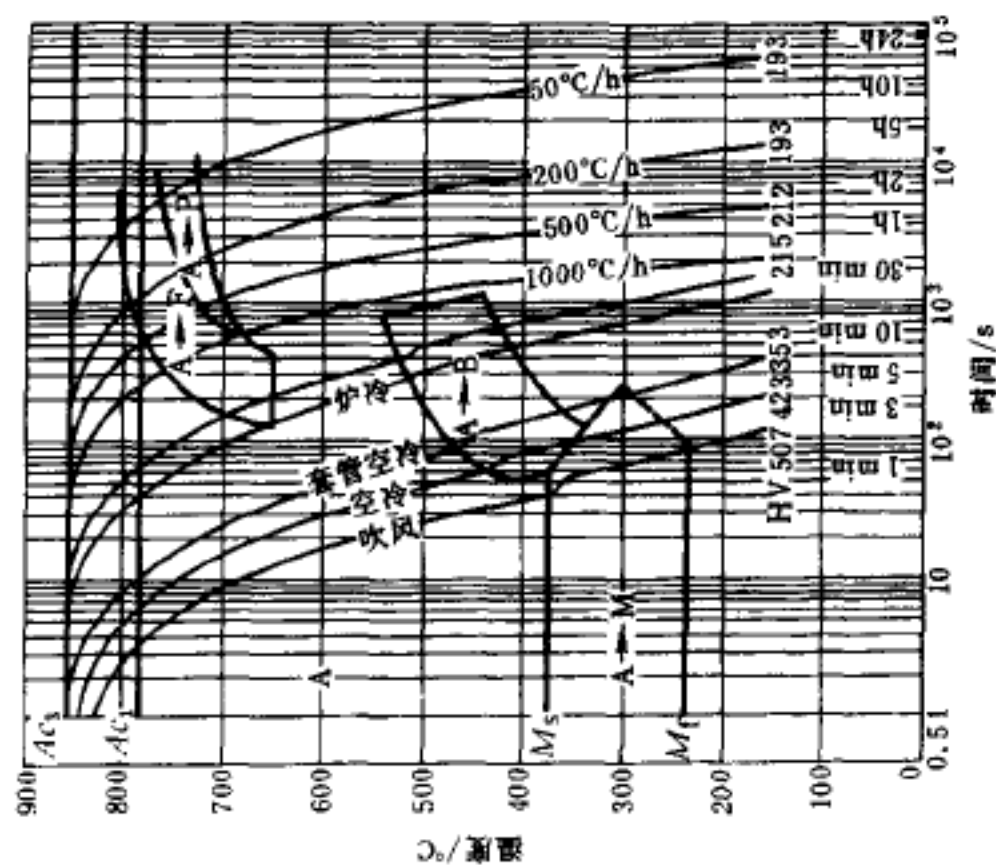
表图 5.2-22 20Cr2Ni4A 钢



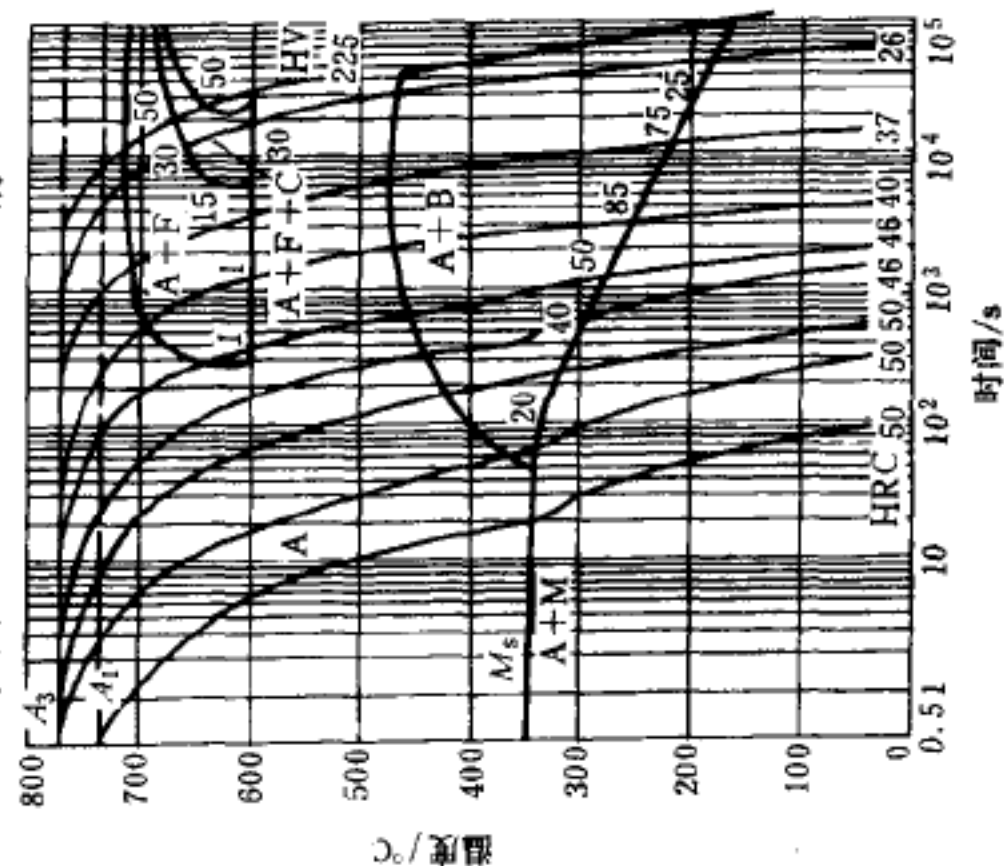
表图 5.2-25 25Cr2MoVA 钢



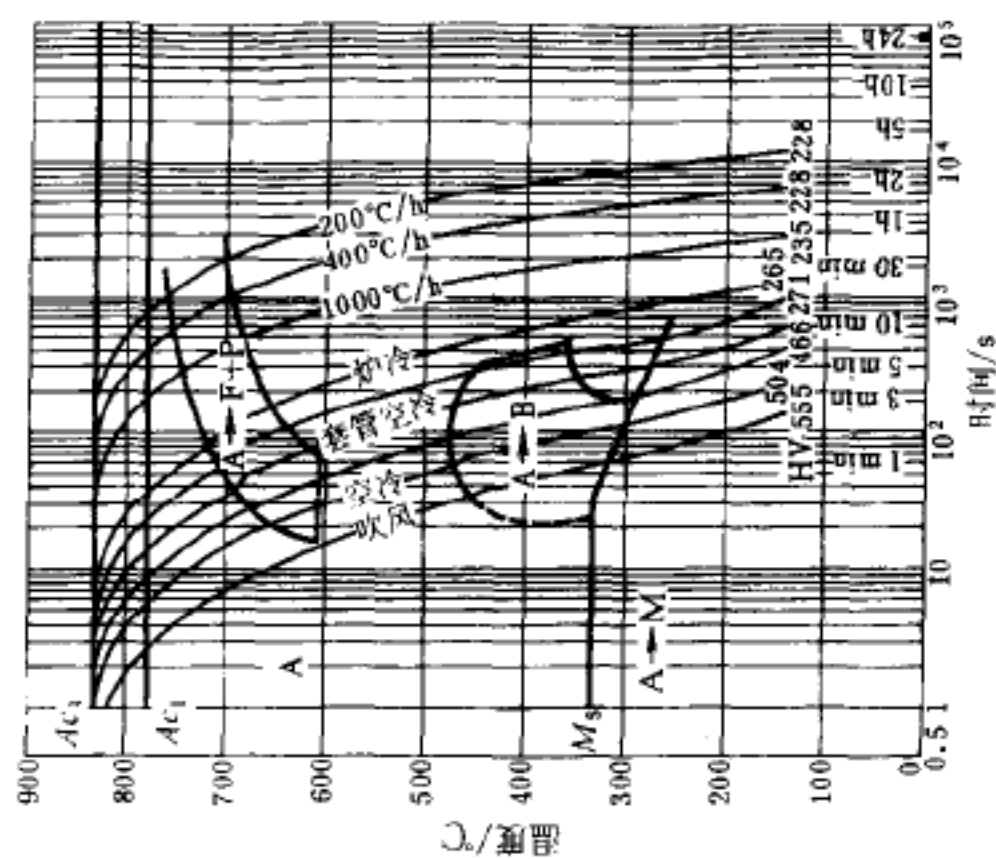
表图 5.2-28 40CrNiMo 钢



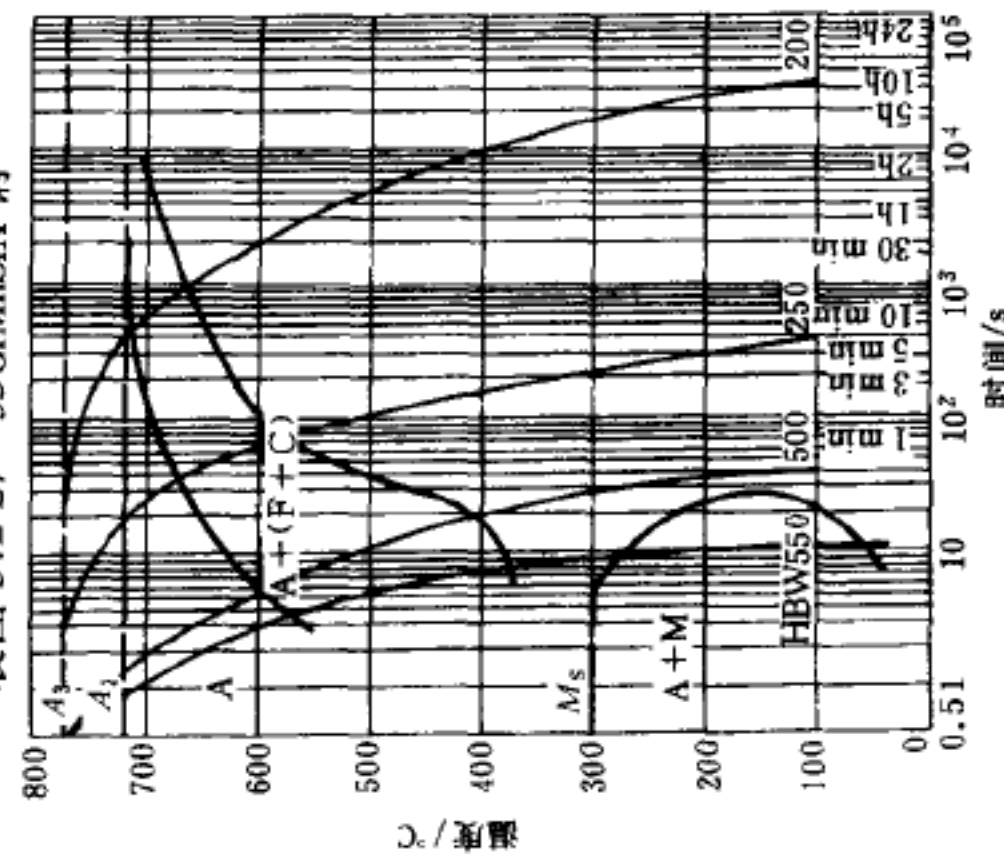
表图 5.2-26 38CrMoAlA 钢



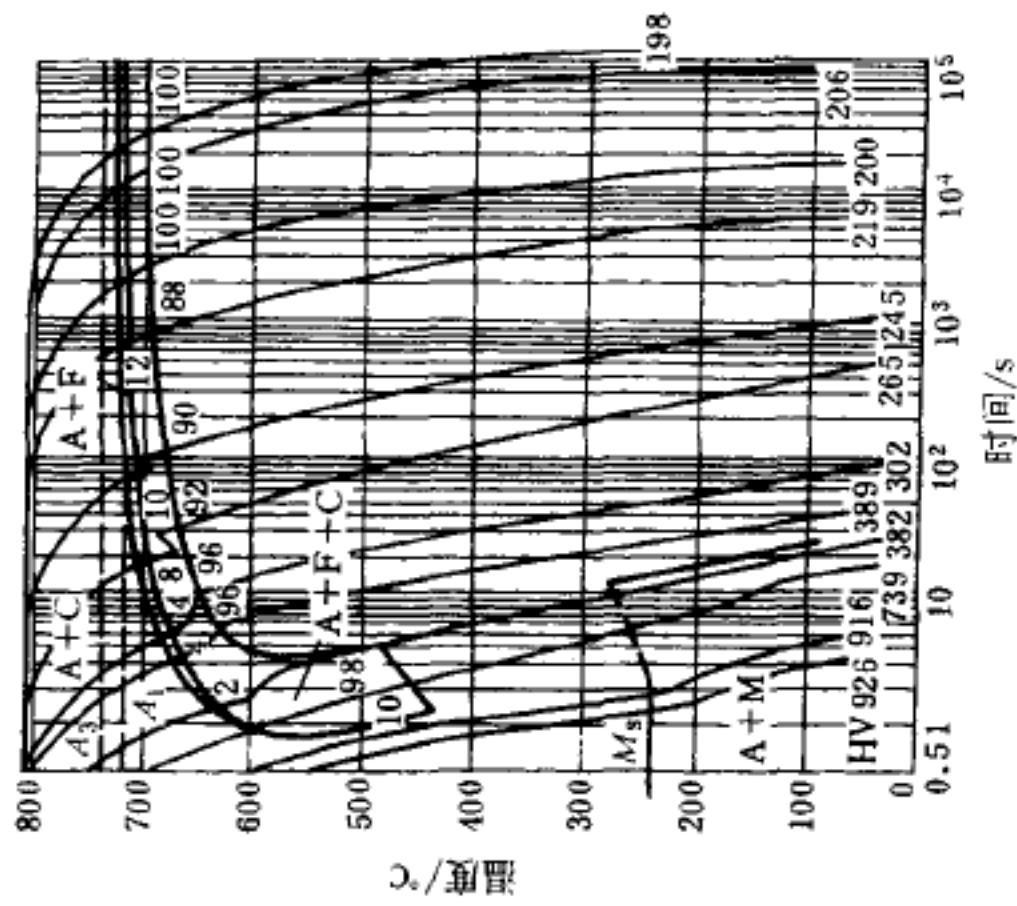
表图 5.2-29 30Cr2Ni2Mo 钢



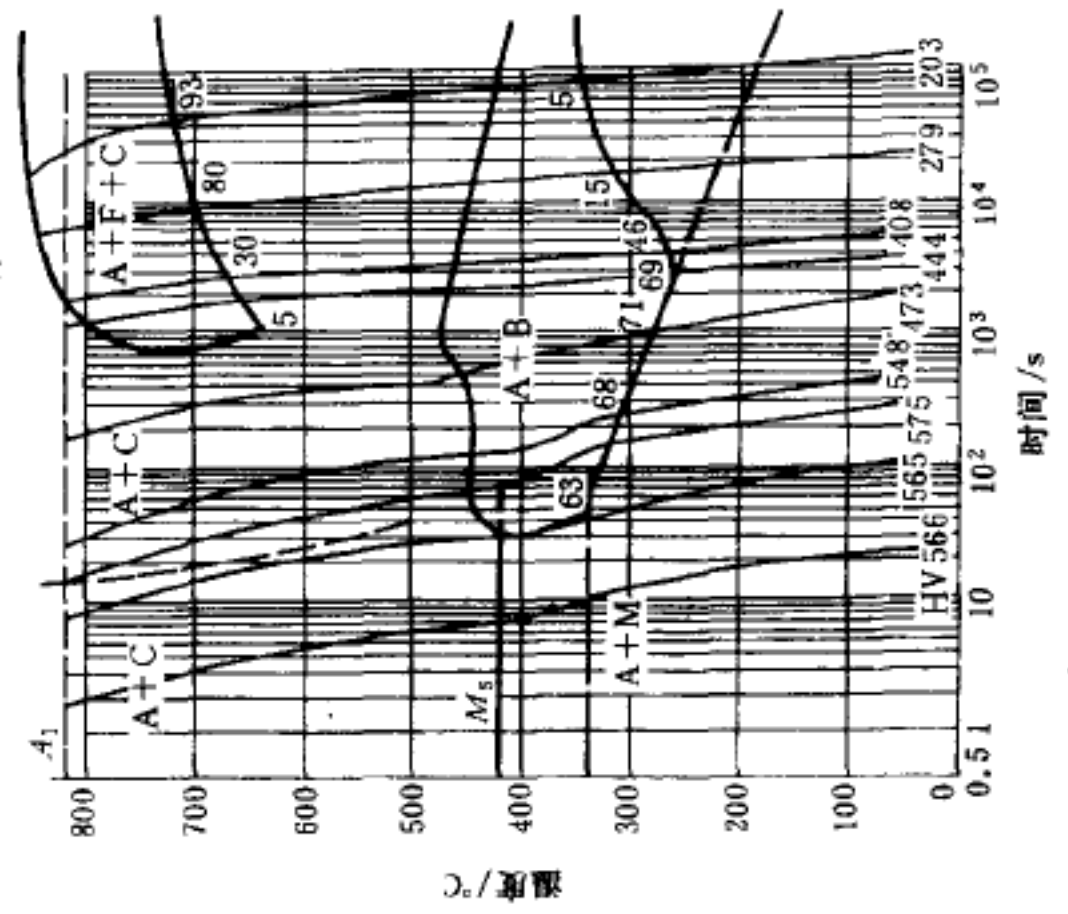
表图 5.2-27 35CrMnSiA 钢



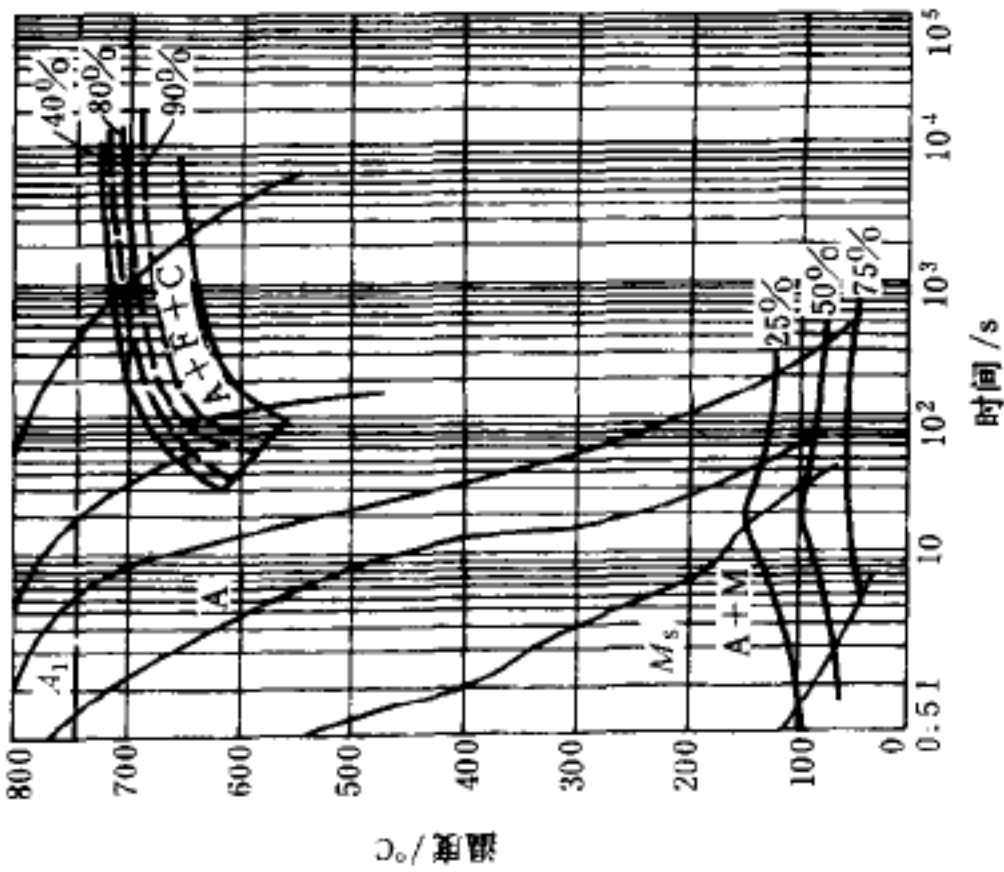
表图 5.2-30 65 钢



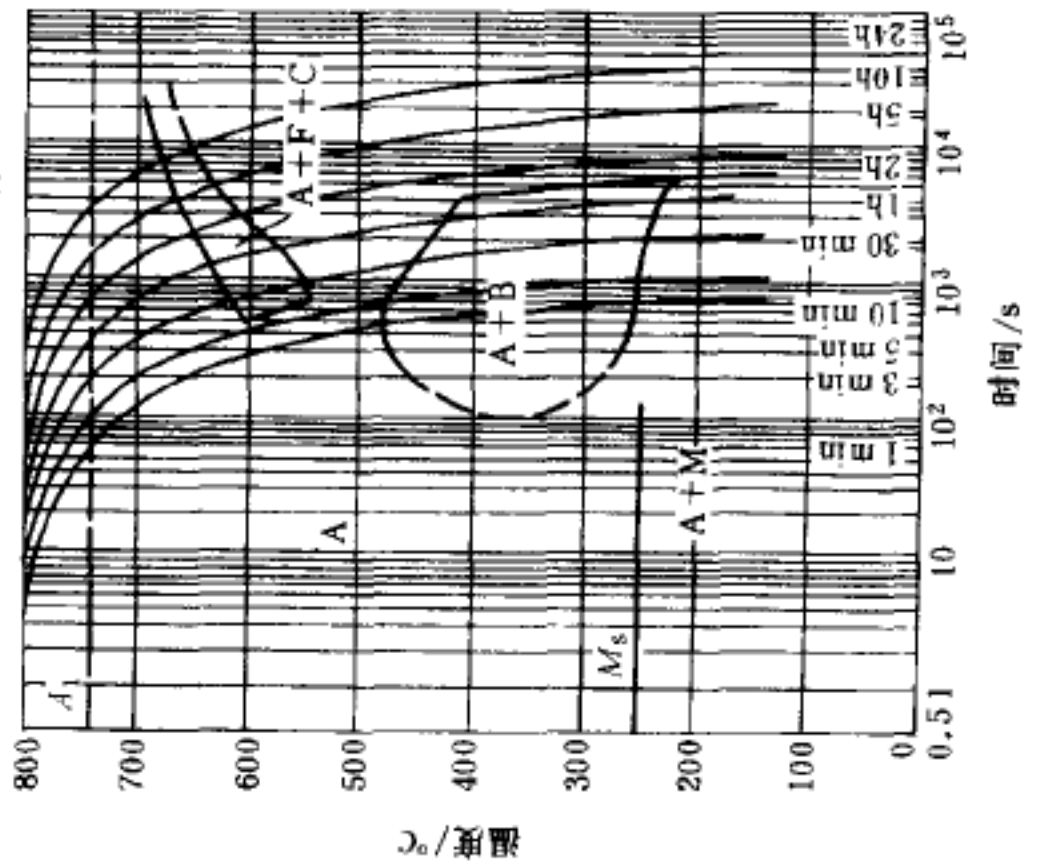
表图 5.2-33 T8 钢



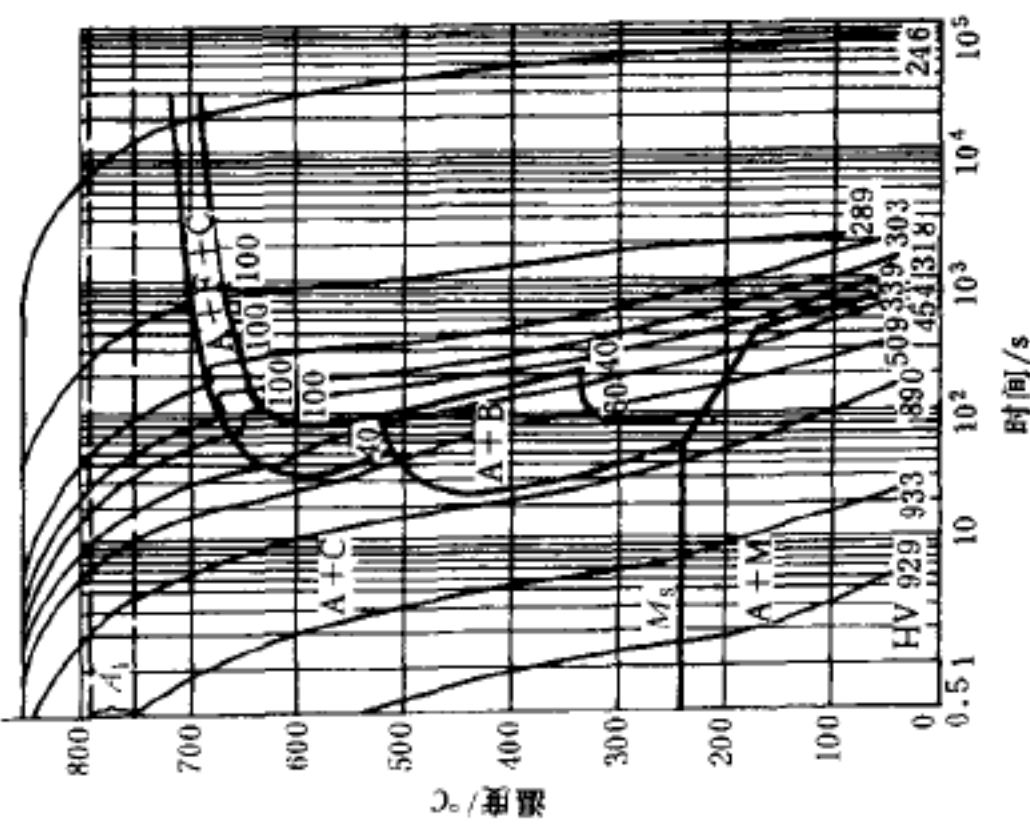
表图 5.2-36 3Cr2W8V 钢



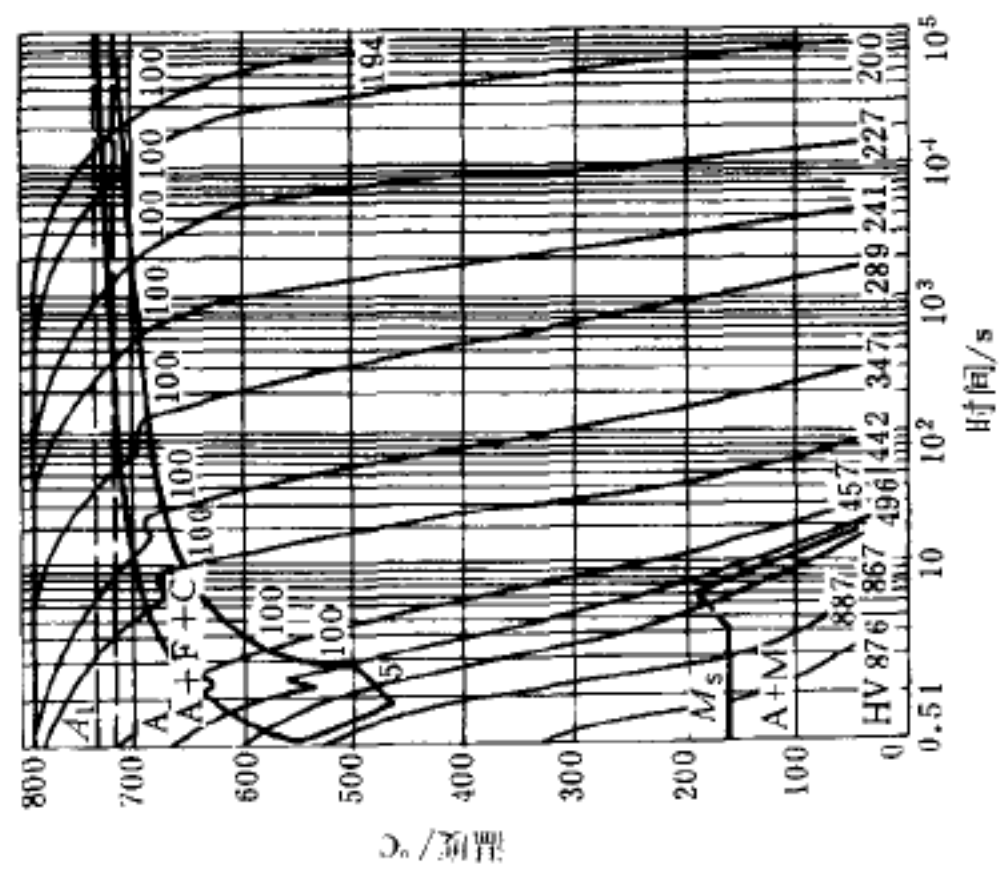
表图 5.2-32 GCr15SiMn 钢



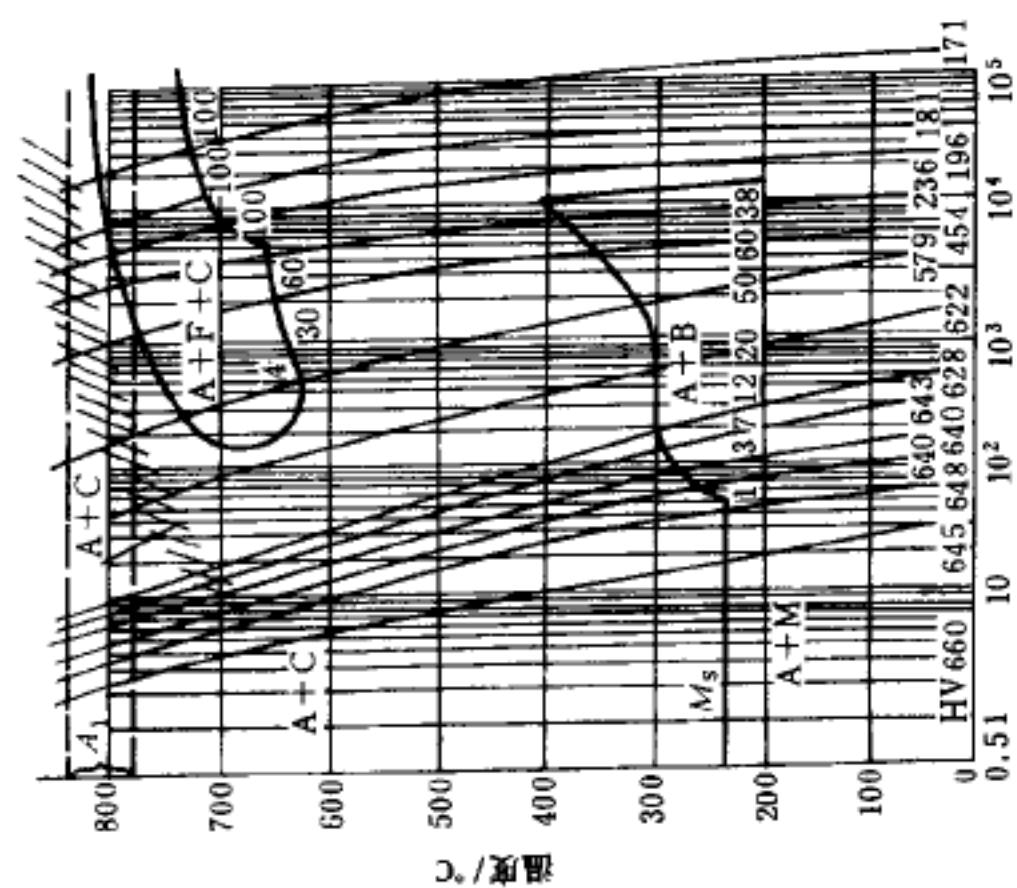
表图 5.2-35 5CrMnMo 钢



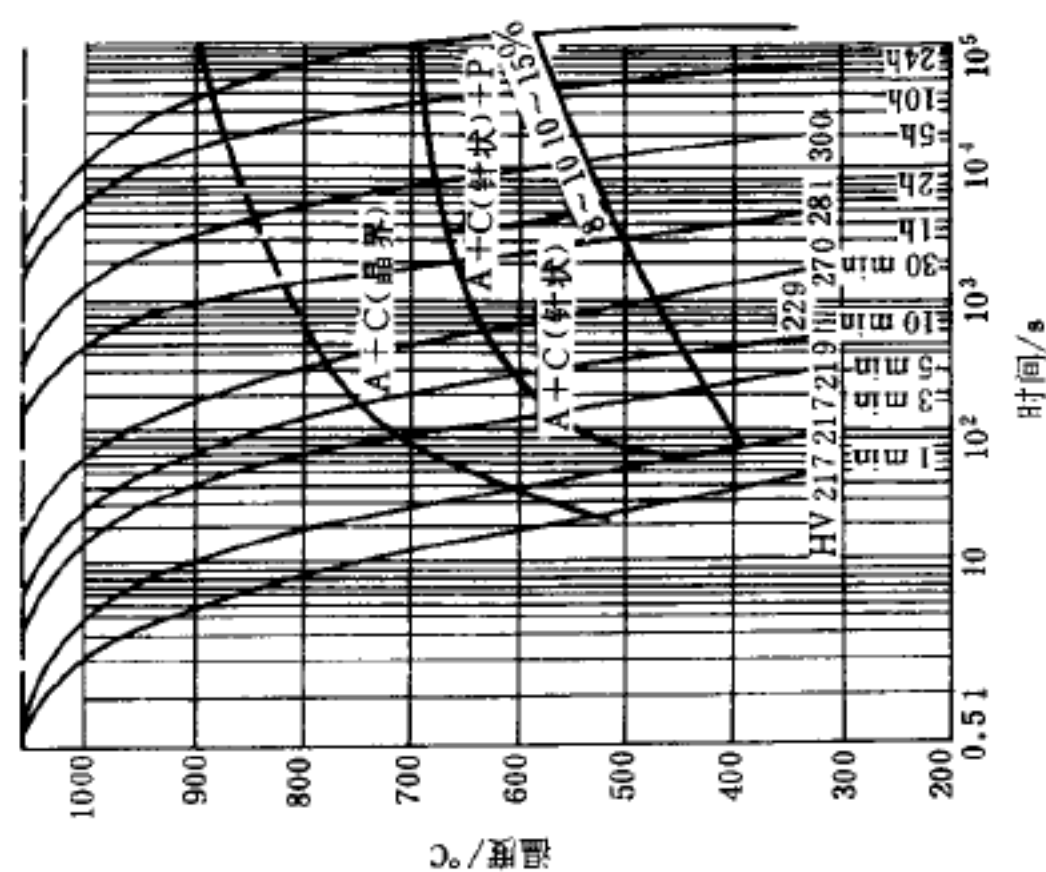
表图 5.2-31 GCr15 钢



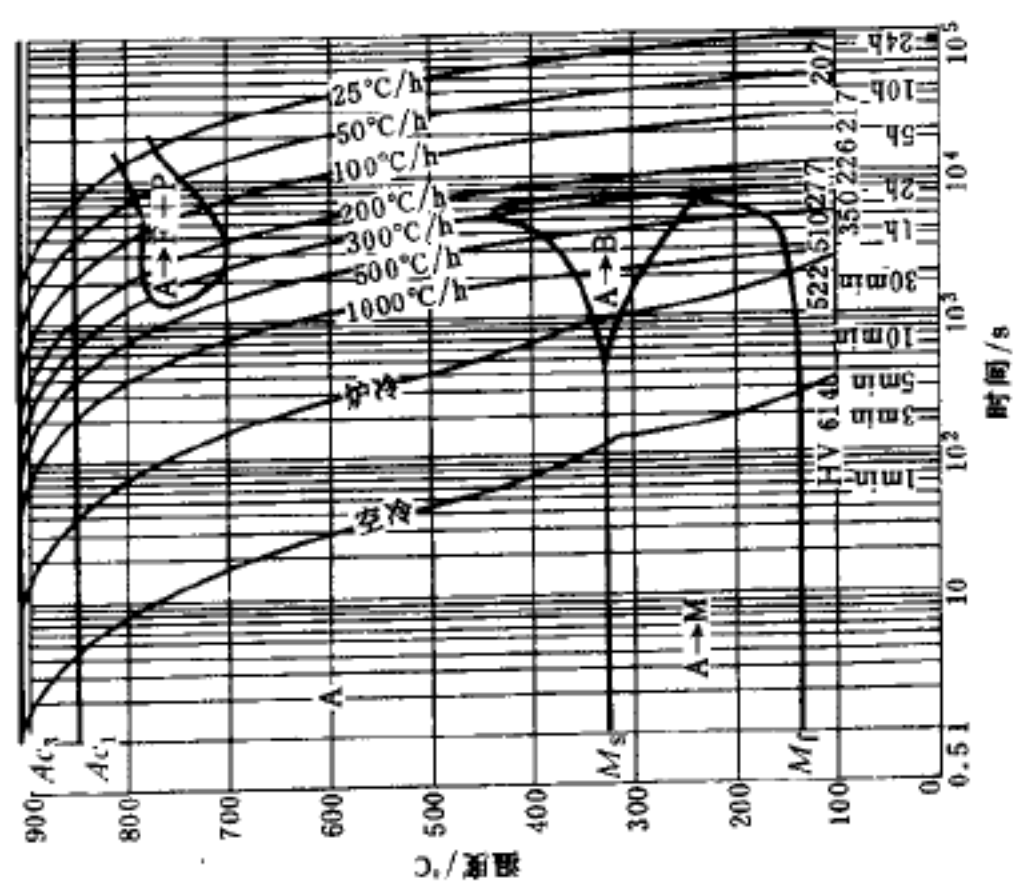
表图 5.2-34 T10 钢



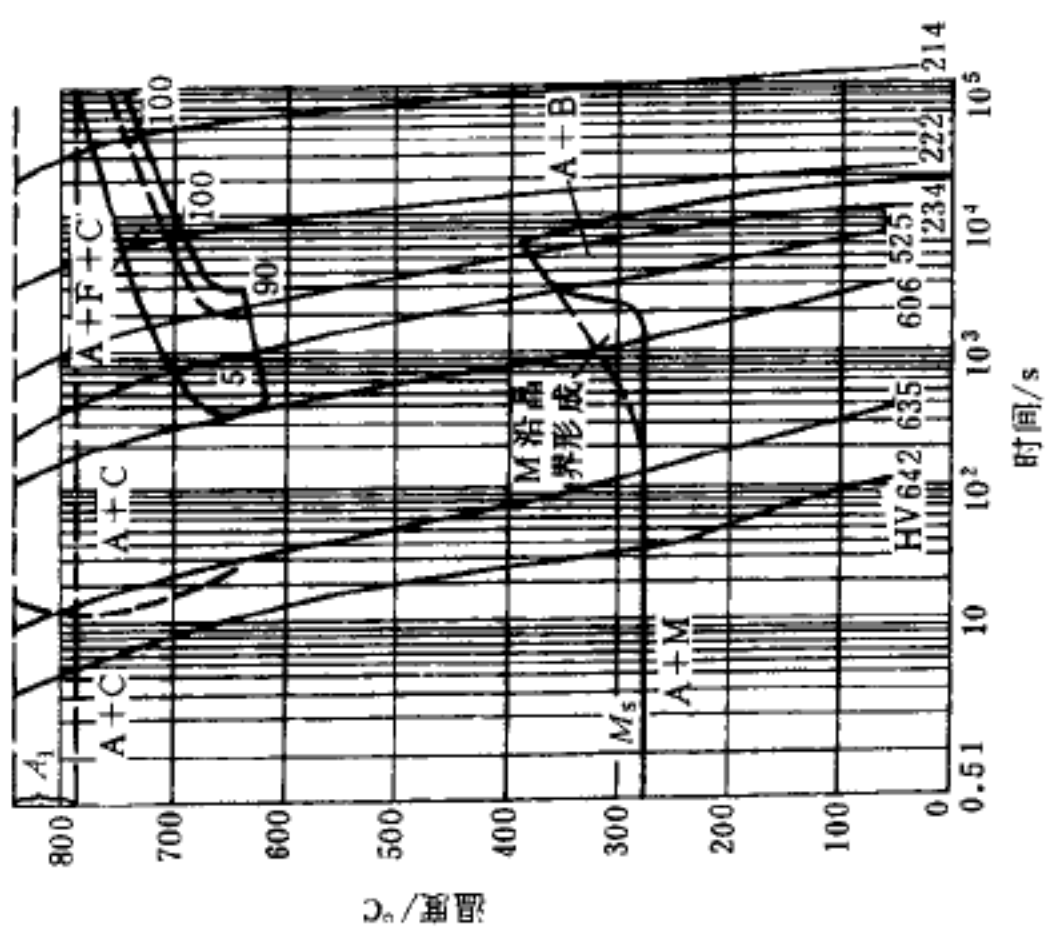
表图 5.2-38 3Cr13 钢



表图 5.2-40 Mn13 钢



表图 5.2-37 4Cr5MoVSi 钢



表图 5.2-39 4Cr13 钢

5.3 常用钢的淬透性曲线(表 5-3, 表图 5.3-1 ~ 表图 5.3-111)

表 5-3 钢淬透性曲线原始条件

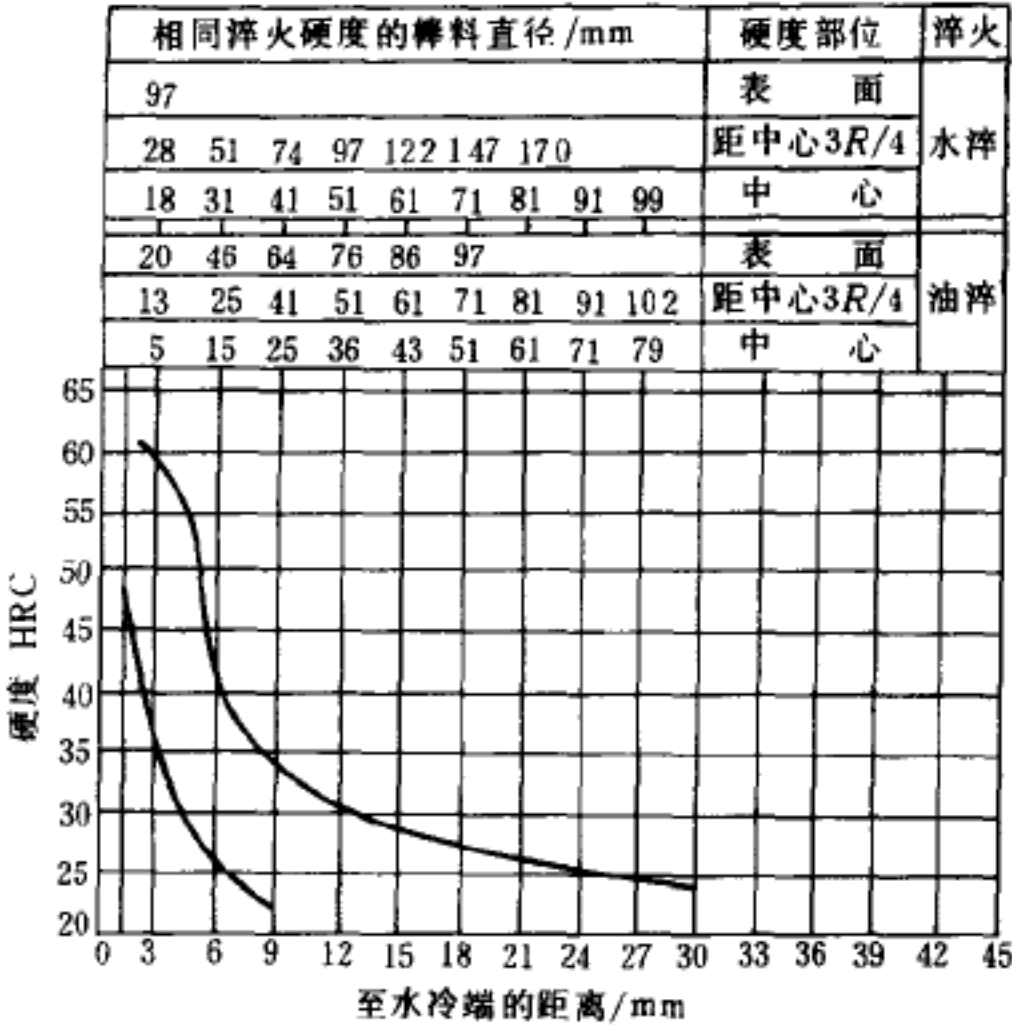
表图号	钢 号	化 学 成 分 (质量分数)(%)								正火温度 /℃	奥氏体化 (端淬) 温度/℃	晶 粒 度	
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	B				其他
保证淬透性结构钢(GB5216—1985)													
表图 5.3-1	45H	0.42~0.50	0.17~0.37	0.50~0.85							850~870	840±5	
表图 5.3-2	20CrH	0.17~0.23	0.17~0.37	0.50~0.85	0.70~1.10						880~900	870±5	
表图 5.3-3	40CrH	0.37~0.44	0.17~0.37	0.50~0.85	0.70~1.10						860~880	850±5	
表图 5.3-4	45CrH	0.42~0.49	0.17~0.37	0.50~0.85	0.70~1.10						860~880	850±5	
表图 5.3-5	40MnBH	0.37~0.44	0.17~0.37	1.00~1.40					0.0005~0.0035		880~900	850±5	
表图 5.3-6	45MnBH	0.42~0.49	0.17~0.37	0.95~1.40					0.0005~0.0035		880~900	850±5	
表图 5.3-7	20MnMoBH	0.16~0.22	0.17~0.37	0.90~1.25			0.20~0.30		0.0005~0.0035		930~950	880±5	
表图 5.3-8	20MnVBH	0.17~0.23	0.17~0.37	1.05~1.50				0.07~0.12	0.0005~0.0035		930~950	860±5	
表图 5.3-9	22MnVBH	0.19~0.25	0.17~0.37	1.25~1.65				0.07~0.12	0.0005~0.0035		930~950	860	
表图 5.3-10	20MnTiBH	0.17~0.23	0.17~0.37	1.20~1.55					0.0005~0.0035	Ti:0.04~0.10	930~950	860±5	
表图 5.3-11	20CrMnMoH	0.17~0.23	0.17~0.37	0.85~1.20	1.05~1.40		0.20~0.30				860~880	880±5	
表图 5.3-12	20CrMnTiH	0.17~0.23	0.17~0.37	0.80~1.15	1.00~1.35					Ti:0.04~0.10	900~920	880±5	
表图 5.3-13	20CrNi3H	0.17~0.23	0.17~0.37	0.30~0.65	0.60~0.95	2.70~3.25					850~870	830±5	
表图 5.3-14	12Cr2Ni4H	0.10~0.17	0.17~0.37	0.30~0.65	1.20~1.75	3.20~3.75					880~900	860±5	
表图 5.3-15	20CrNiMoH	0.17~0.23	0.17~0.37	0.60~0.95	0.35~0.65	0.35~0.75	0.15~0.25				930~950	925±5	
优质碳素结构钢													
表图 5.3-16	20	0.17~0.24	0.17~0.37	0.35~0.65	≤0.25	≤0.25						840	6~8
表图 5.3-17	25	0.22~0.29	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25	≤0.25							7~8
表图 5.3-18	30	0.27~0.34	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25	≤0.25						865	2~4
表图 5.3-19	35	0.32~0.39	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25	≤0.25						870	5~8
表图 5.3-20	40	0.37~0.44	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25	≤0.25						850	
表图 5.3-21	45	0.42~0.49	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25	≤0.25						840	6~7
表图 5.3-22	50	0.47~0.55	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25	≤0.25						840	6~8
表图 5.3-23	55	0.52~0.60	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25	≤0.25						840	6~8
表图 5.3-24	60	0.57~0.65	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25	≤0.25						820	6~8

(续)

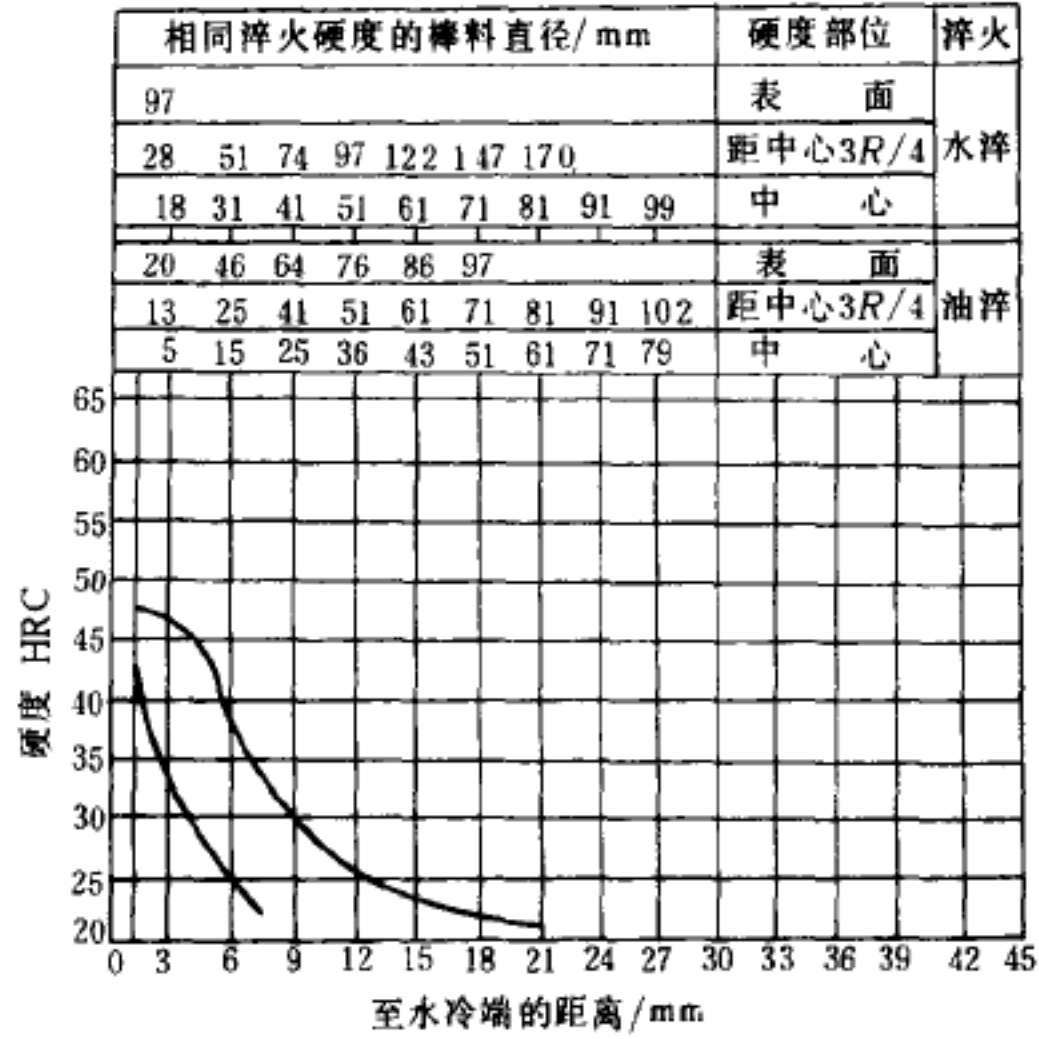
表图号	钢 号	化 学 成 分 (质量分数)(%)								正火温度 /℃	奥氏体化 (端淬) 温度/℃	晶 粒 度
		化 学 成 分 (质量分数)(%)										
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	B			
合金结构钢												
表图 5.3-70	30CrNi3	0.31		0.42	0.65	3.15						870
表图 5.3-71	12Cr2Ni4	0.11~0.17	0.17~0.37	0.30~0.60	1.25~1.75	3.25~3.75						840
表图 5.3-72	20Cr2Ni4	0.20	0.36	0.37	1.60	3.47				S:0.003 P:0.015		840
表图 5.3-73	30CrNiMo	0.27~0.33	0.20~0.35	0.60~0.95	0.35~0.65	0.35~0.75	0.15~0.25					870
表图 5.3-74	40CrNiMo	0.37~0.45	0.20~0.35	0.85~1.25	0.25~0.55	0.25~0.65	0.08~0.15					
表图 5.3-75	18Cr2Ni4W (1) (2)	0.21 0.19		0.35 0.36	0.15 0.14	4.15 4.15	0.10 0.10			W:0.72 W:0.75		
表图 5.3-76	40B	0.37~0.45	0.34~0.53	0.52~0.89				0.0014~0.0049				840 6~7
表图 5.3-77	45B	0.40~0.50	0.24~0.39	0.58~0.89				0.0018~0.0049				840 6~7
表图 5.3-78	40MnB	0.36~0.44	0.17~0.47	1.01~1.42				0.0032~0.0062				880 7
表图 5.3-79	20Mn2B	0.21	0.32	1.65				0.0041				880
表图 5.3-80	20MnMoB	0.16~0.22	0.23~0.32	1.05~1.25			0.13~0.43	0.0032~0.0050				870
表图 5.3-81	20MnTiB (1) (2)	0.22 0.17	0.27 0.26	1.15 1.15				0.004 0.0043	Ti:0.10			7~8 7
表图 5.3-82	20MnVB	0.19~0.23	0.26~0.34	1.00~1.40				0.10~0.13	0.0023~0.0055			920 5~7
表图 5.3-83	40MnVB	0.32~0.46	0.28~0.36	1.07~1.51				0.06~0.26	0.0035~0.0051			850~870 7
表图 5.3-84	20SiMnVB	0.18~0.24	0.41~0.71	0.80~1.52				0.08~0.14	0.0017~0.0044			920
表图 5.3-85	20CrMnMoVB	0.18~0.24	0.13~0.34	0.87~1.04	0.25~0.35		0.22~0.35	0.04~0.15	0.0047~0.0052			
表图 5.3-86	25MnTiBRE	0.22~0.28	0.20~0.45	1.30~1.60					0.001~0.005	Ti:0.06~0.12 RE:0.05~0.10 S≤0.030 P≤0.030		
弹簧钢												
表图 5.3-87	60	0.63	0.26	0.38	0.20	0.14				Cu:0.20		760 4
表图 5.3-88	85	0.90	0.22	0.21								
表图 5.3-89	55Si2Mn	0.50~0.60	1.50~2.00	0.60~0.90								

(续)

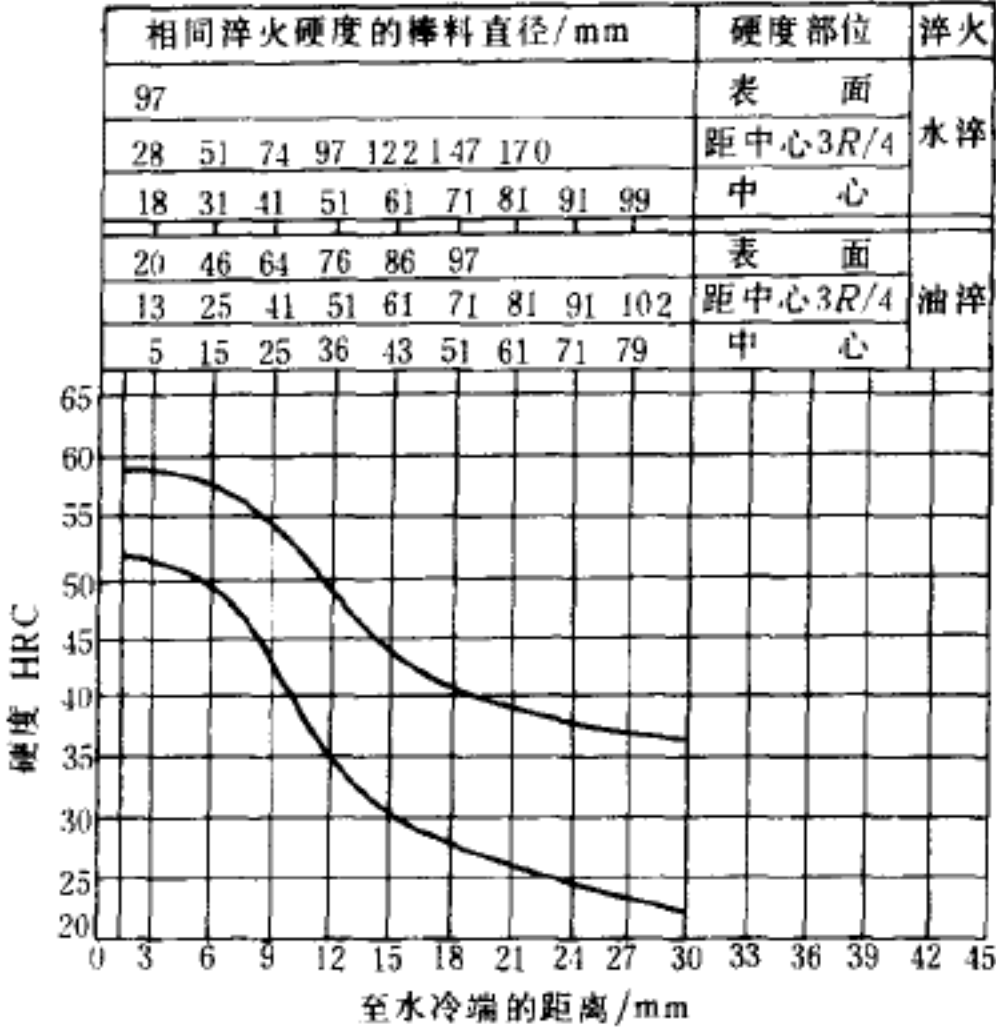
表图号	钢 号	化 学 成 分 (质量分数)(%)								正火温度 /℃	奥氏体化 (端淬) 温度/℃	晶 粒 度
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	B			
弹簧钢												
表图 5.3-90	60Si2Mn	0.54 ~ 0.63	1.65 ~ 1.98	0.70 ~ 0.83								
表图 5.3-91	50CrMn	0.45	0.18	0.90	1.01							835
表图 5.3-92	50CrVA (2)	0.51		0.51	1.04			0.18				5 ~ 8
		0.52		0.46	0.94			0.19				7
表图 5.3-93	50CrMnVA	0.47 ~ 0.54	0.20 ~ 0.35	0.60 ~ 1.00	0.75 ~ 1.20			≥0.15				6
滚动轴承钢												
表图 5.3-94	GCr9	1.09	0.29	0.35	1.21							
表图 5.3-95	GCr9SiMn	1.01	0.52	1.12	1.08							
表图 5.3-96	GCr15	0.95 ~ 1.10	0.15 ~ 0.35	<0.50	1.30 ~ 1.60							
表图 5.3-97	GCr15SiMn	0.95 ~ 1.10	0.40 ~ 0.70	0.90 ~ 1.15	0.90 ~ 1.20							
表图 5.3-98	GSiMnMoV	0.95 ~ 1.10	0.45 ~ 0.65	0.75 ~ 1.05				0.20 ~ 0.40	0.20 ~ 0.30		800	
表图 5.3-99	GSiMnMoVRE	0.95 ~ 1.05	1.10 ~ 1.40	0.15 ~ 0.40				0.40 ~ 0.60	0.15 ~ 0.25		800, 860	
工具钢												
表图 5.3-100	T9	0.90	0.22	0.21								
表图 5.3-101	T12A	1.15 ~ 1.24	0.15 ~ 0.30	0.15 ~ 0.30								760
表图 5.3-102	9Mn2V	0.85 ~ 0.95	≤0.35	1.70 ~ 2.00					0.15 ~ 0.25			790
表图 5.3-103	SiMn	0.95 ~ 1.05	0.65 ~ 0.95	0.60 ~ 0.90								800
表图 5.3-104	6SiMnV	0.57	0.95	0.96					0.16			840
表图 5.3-105	5SiMnMoV	0.45 ~ 0.55	1.50 ~ 1.80	0.50 ~ 0.70	0.20 ~ 0.40			0.30 ~ 0.50	0.20 ~ 0.30			860
表图 5.3-106	9CrSi	0.85 ~ 0.95	1.20 ~ 1.60	0.30 ~ 0.60	0.95 ~ 1.25							820 ~ 860
表图 5.3-107	Cr2	0.95 ~ 1.10	≤0.35	≤0.40	1.30 ~ 1.60							
表图 5.3-108	4CrMnMo	0.43		0.85	1.15			0.50				885 ~ 815
表图 5.3-109	CrW	1.04	0.25	0.31	0.85	0.20						850
表图 5.3-110	9CrWMn	0.93	0.16	1.12	0.66	0.09						830
表图 5.3-111	CrV	1.00			1.40				0.20			840



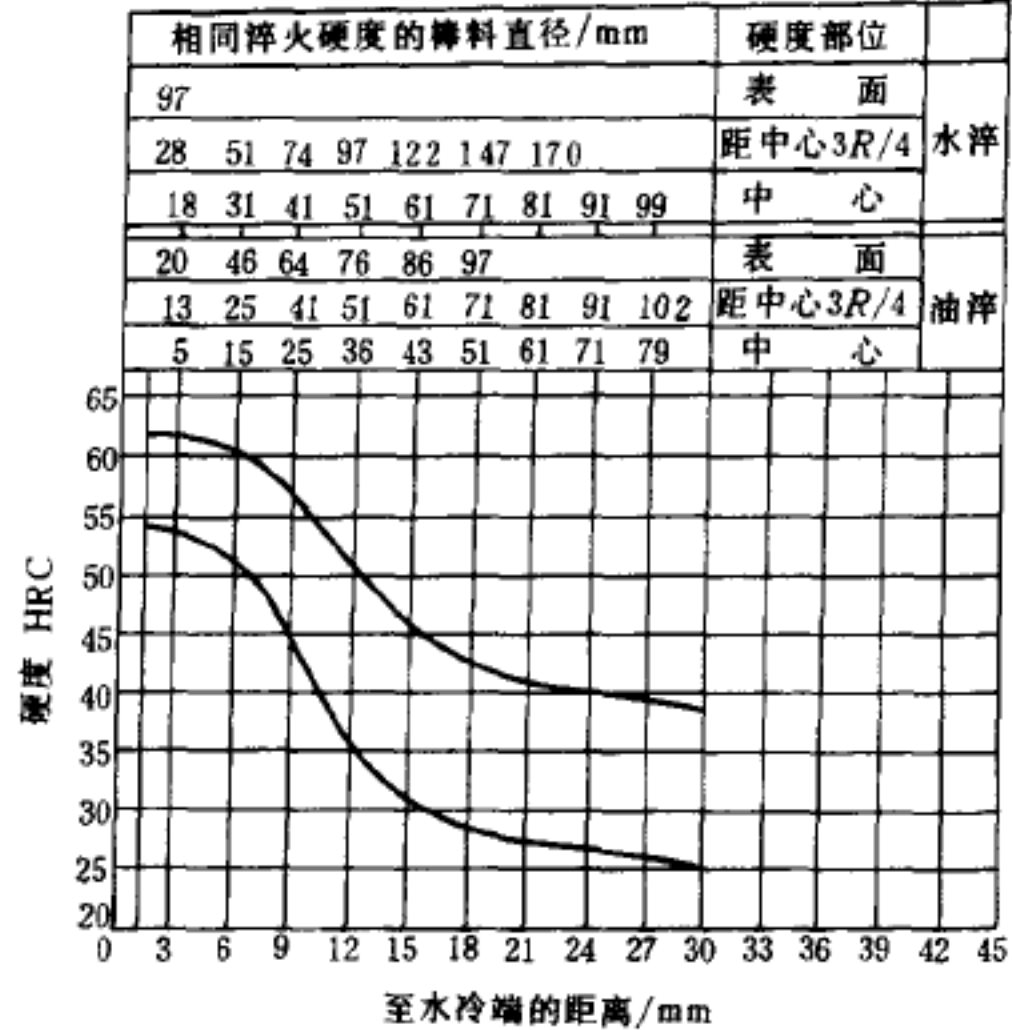
表图 5.3-1 45H 钢



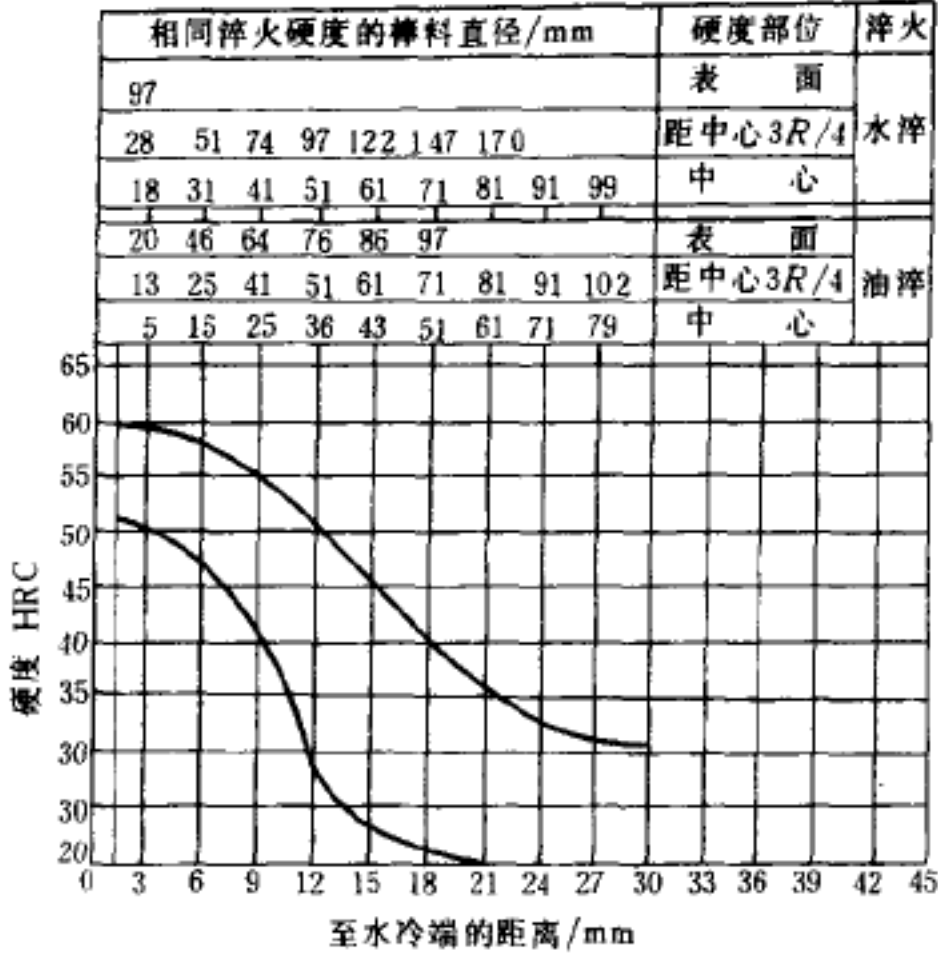
表图 5.3-2 20CrH 钢



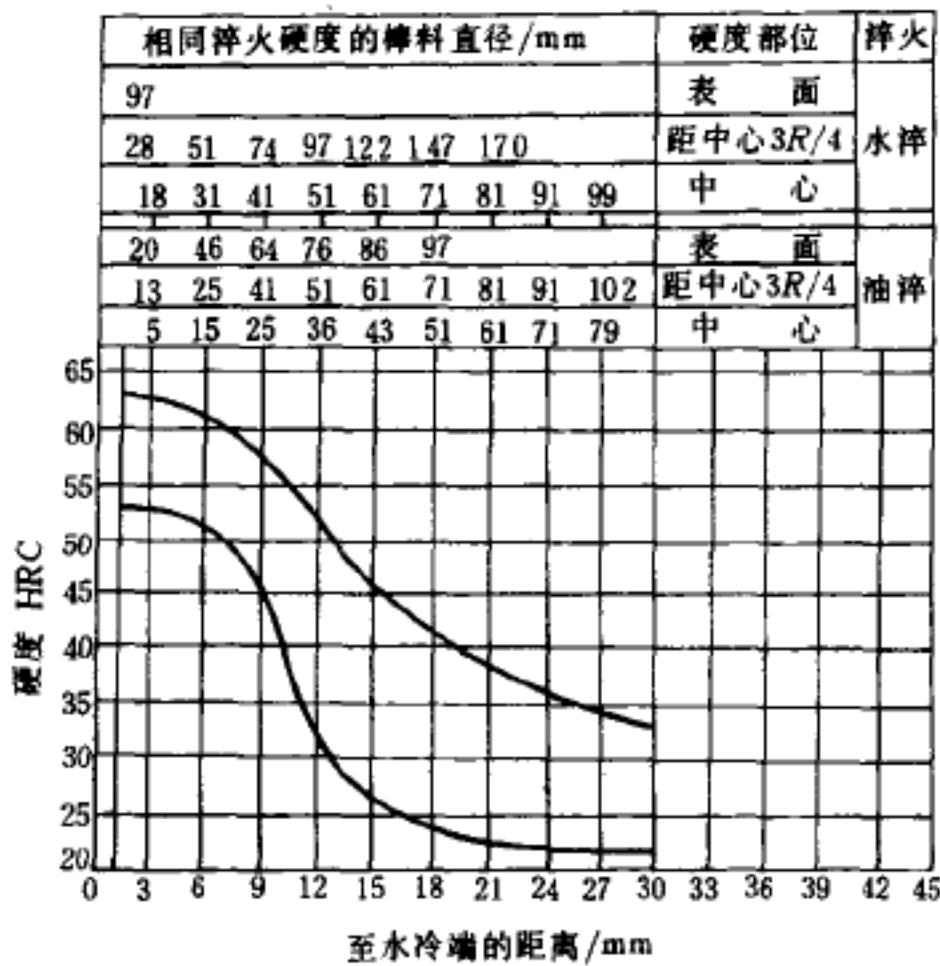
表图 5.3-3 40CrH 钢



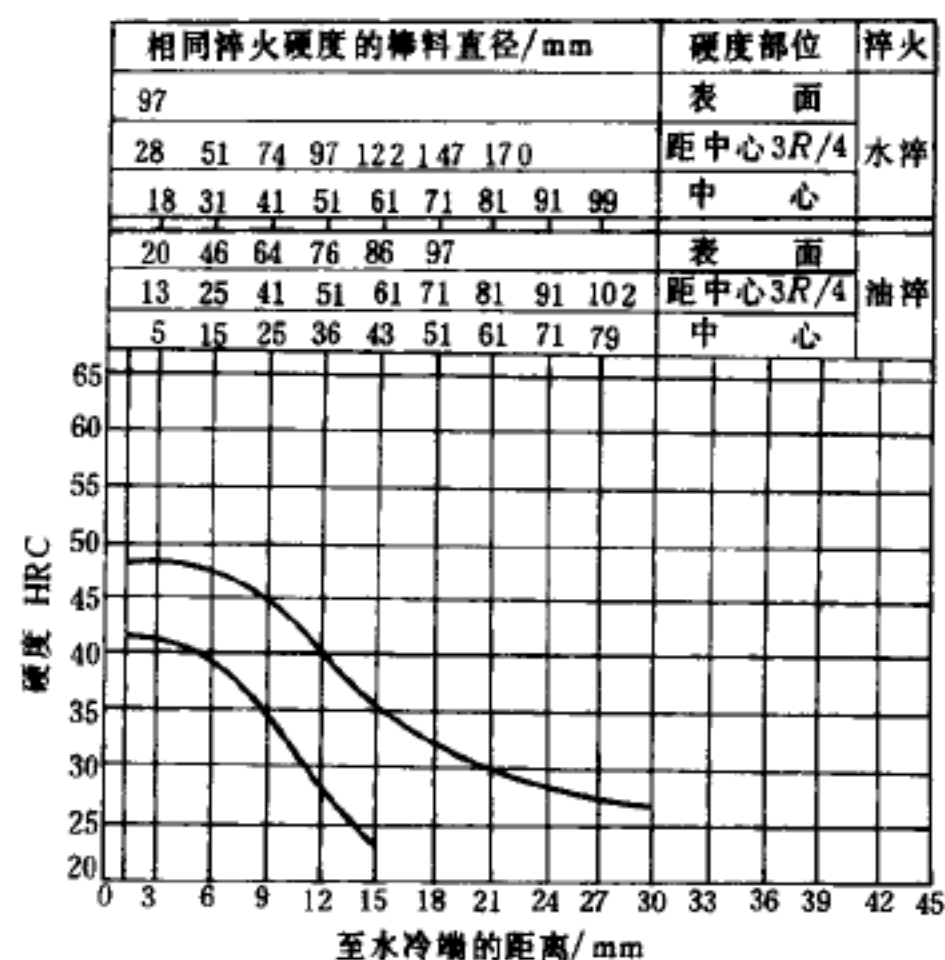
表图 5.3-4 45CrH 钢



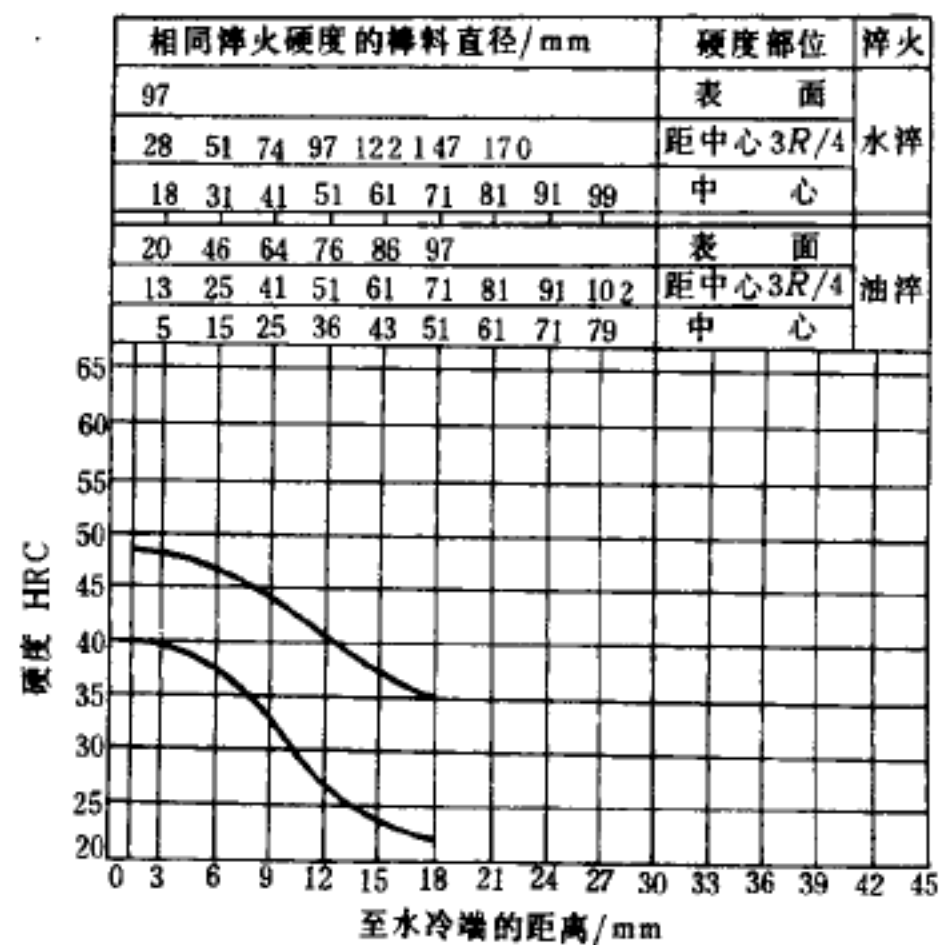
表图 5.3-5 40MnBH 钢



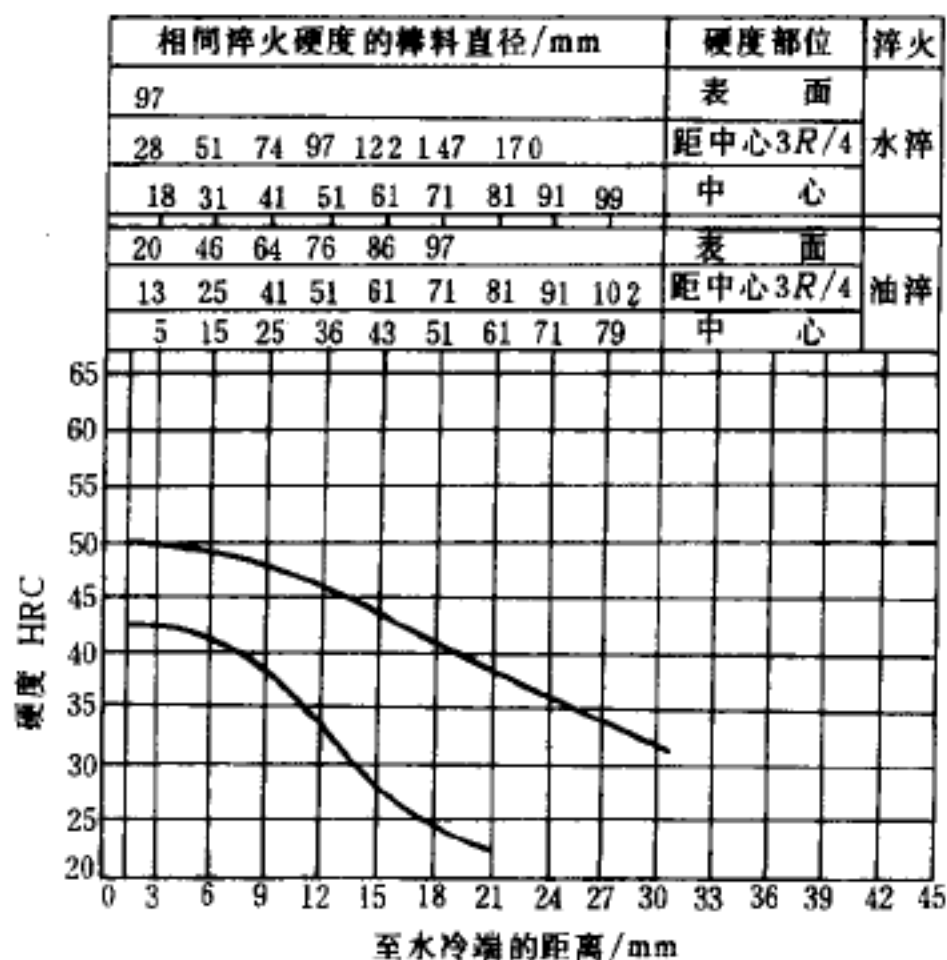
表图 5.3-6 45MnBH 钢



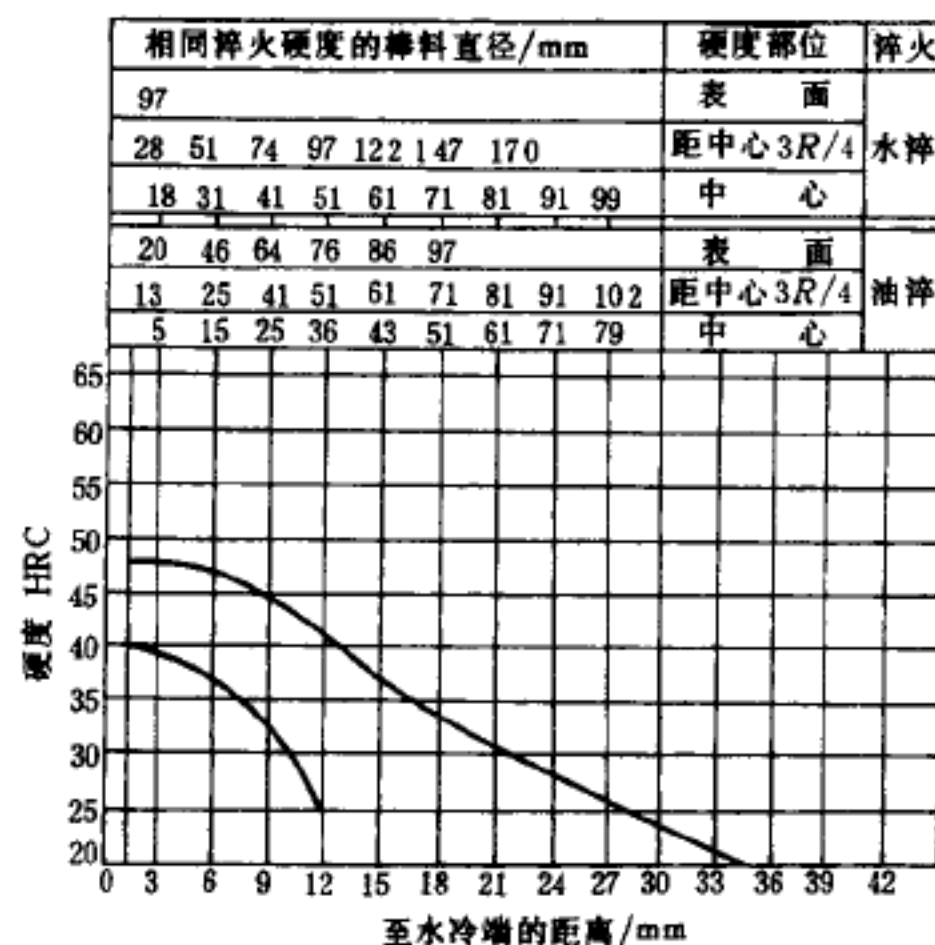
表图 5.3-7 20MnMoBH 钢



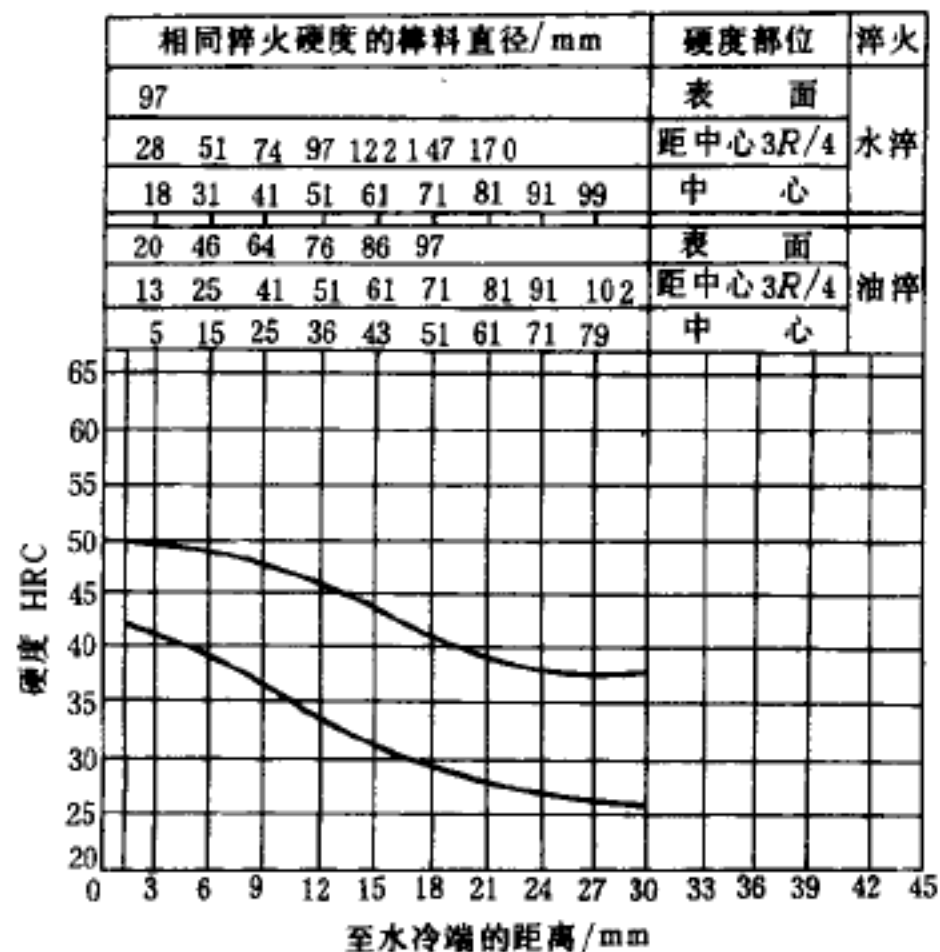
表图 5.3-8 20MnVBH 钢



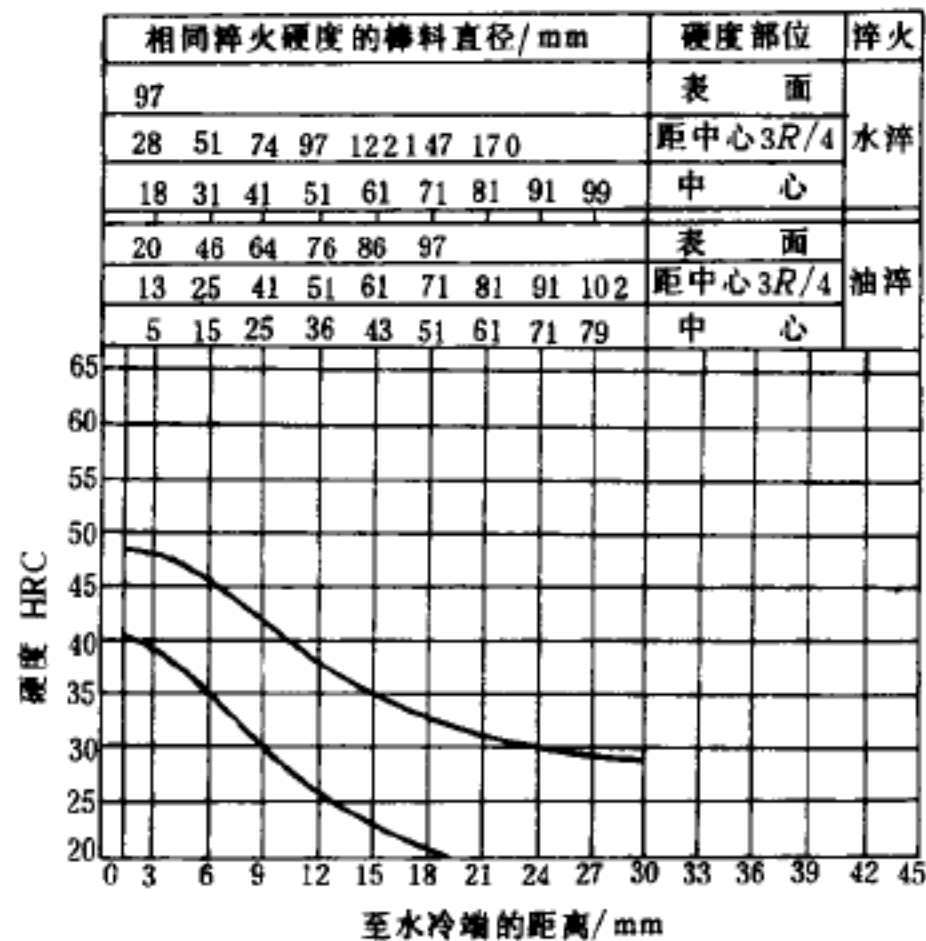
表图 5.3-9 22MnVBH 钢



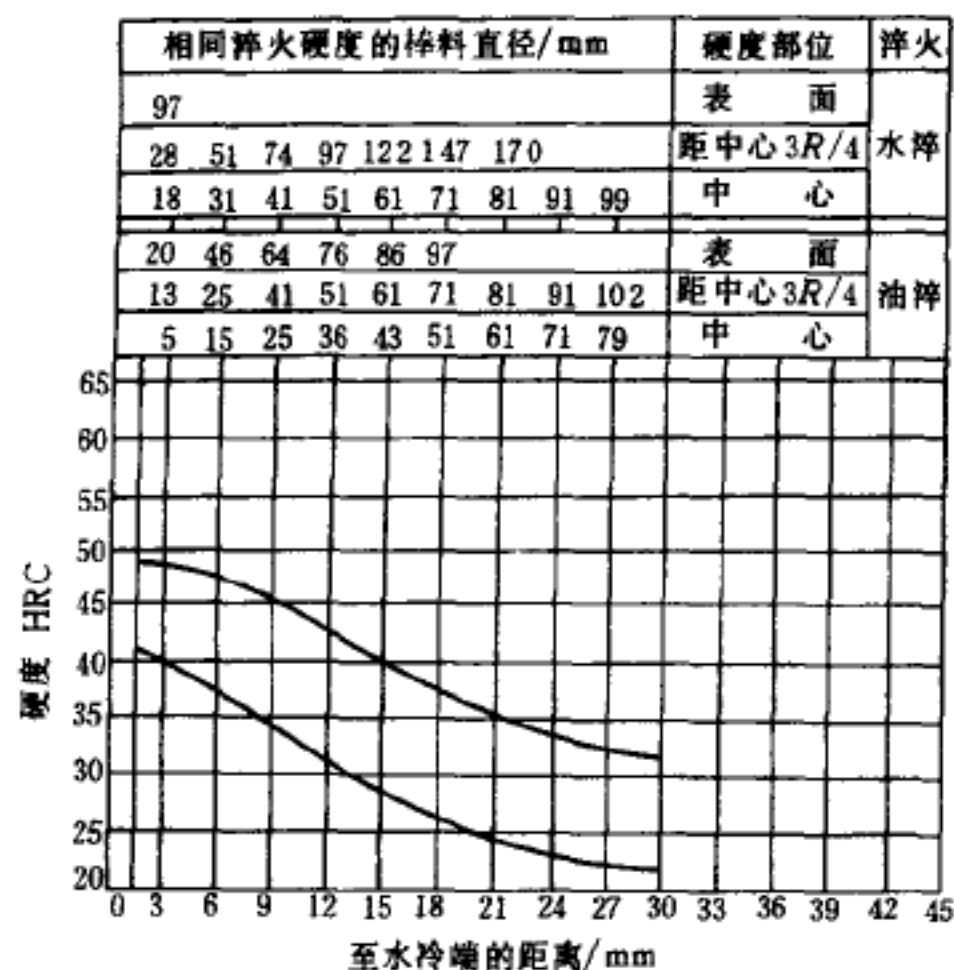
表图 5.3-10 20MnTiBH 钢



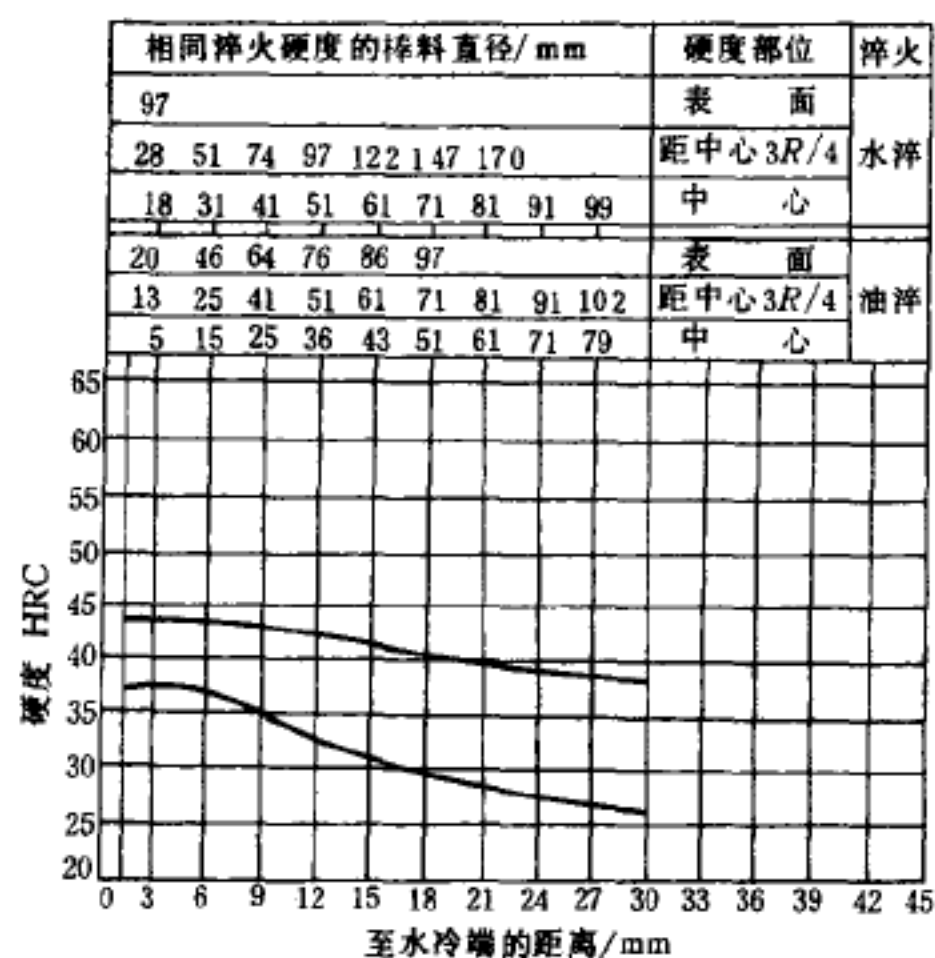
表图 5.3-11 20CrMnMoH 钢



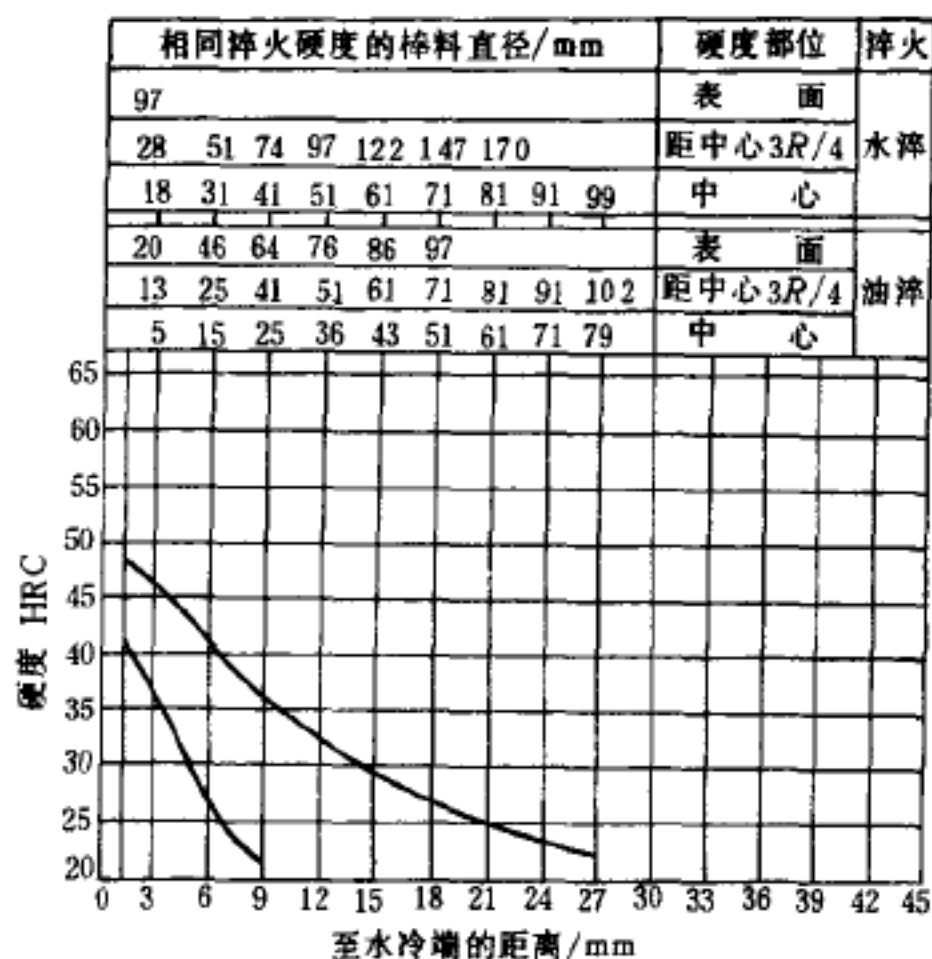
表图 5.3-12 20CrMnTiH 钢



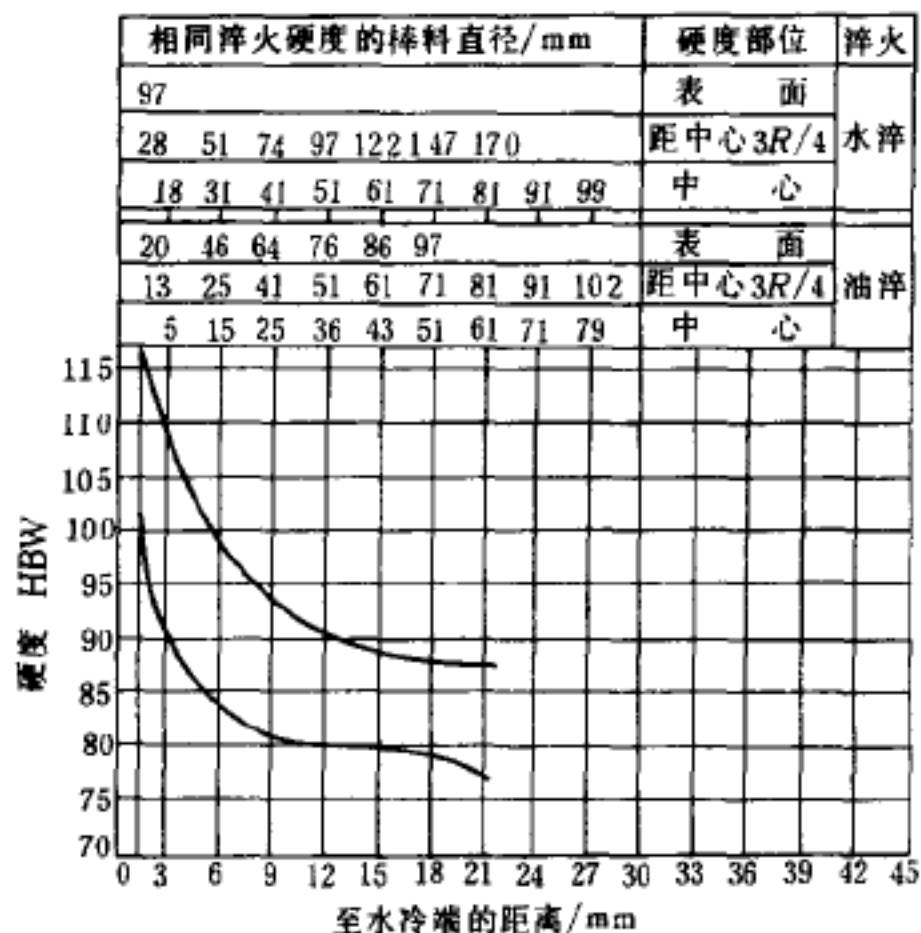
表图 5.3-13 20CrNi3H 钢



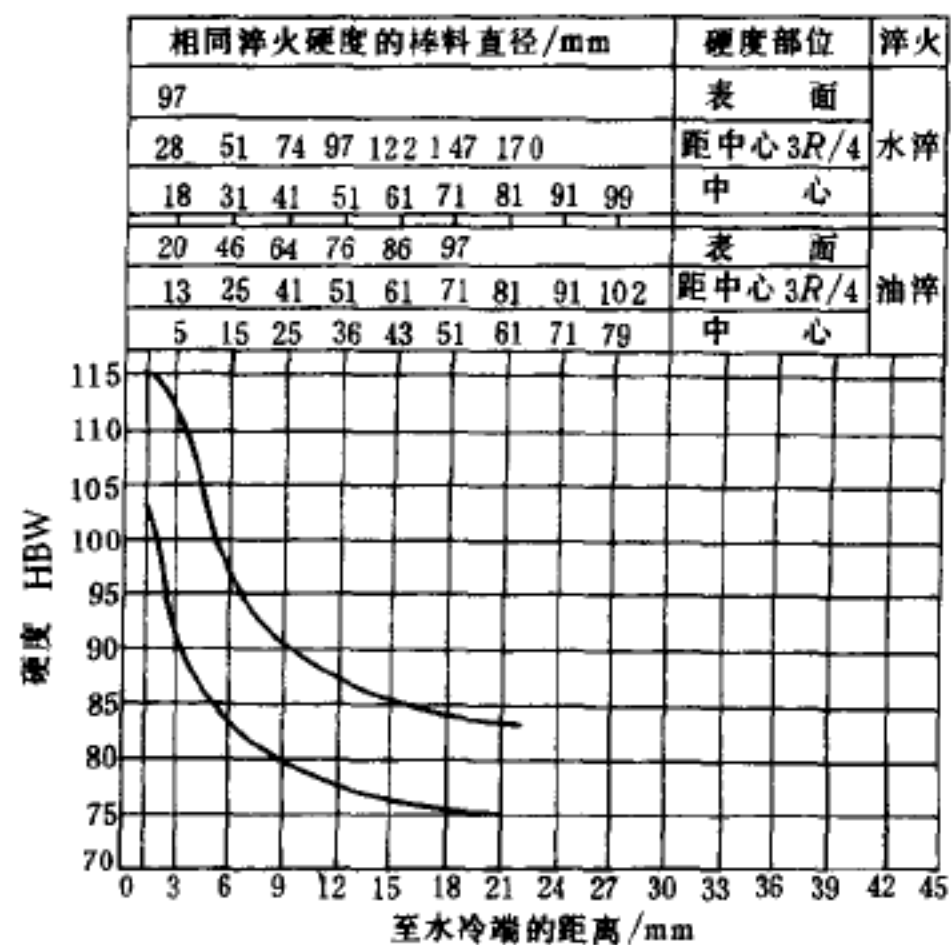
表图 5.3-14 12CrNi4H 钢



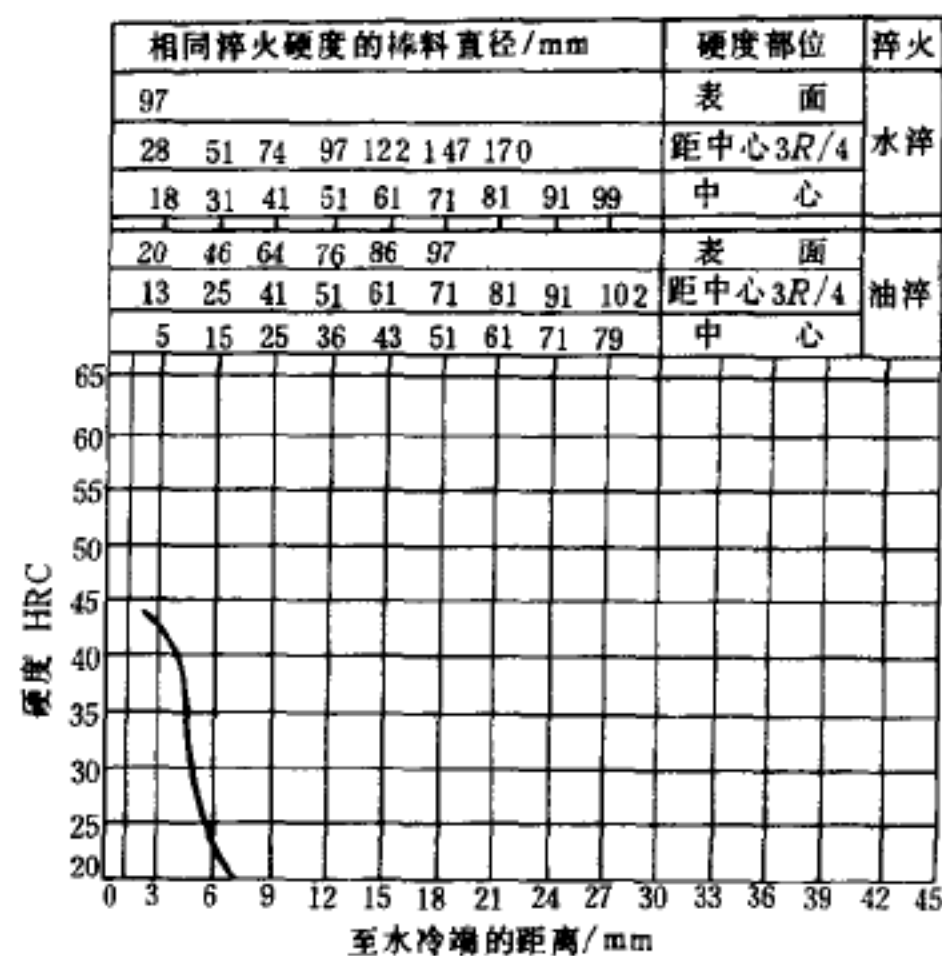
表图 5.3-15 20CrNiMoH 钢



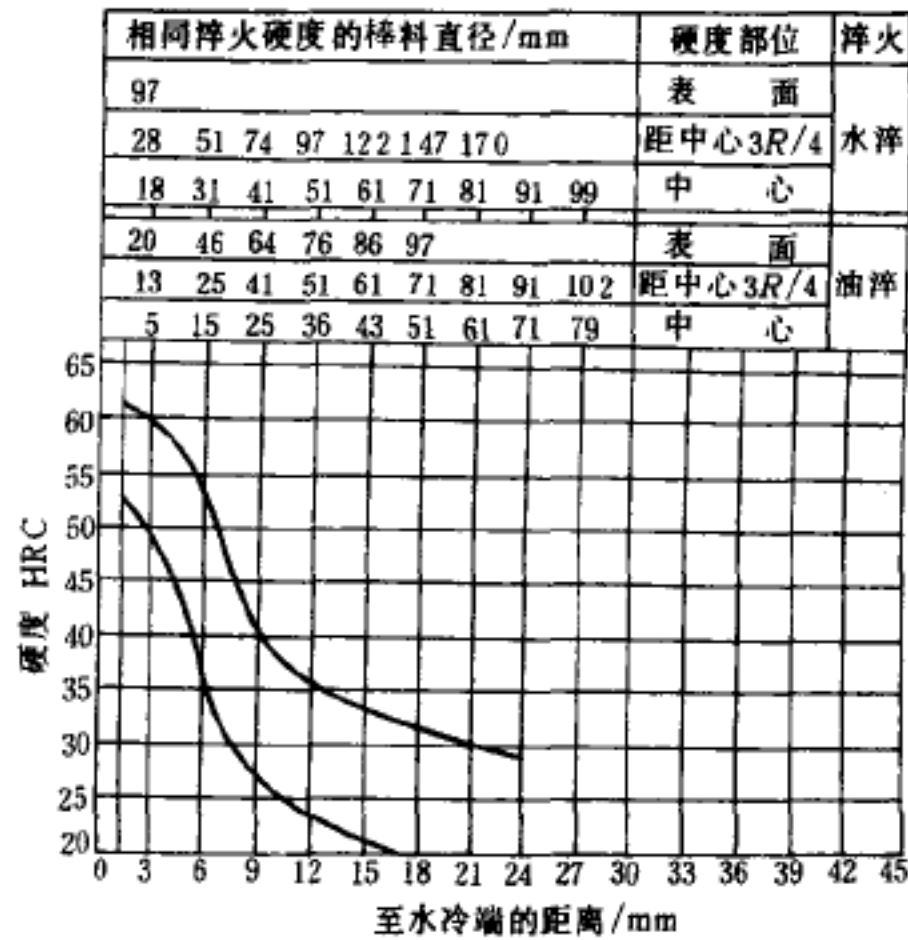
表图 5.3-16 20 钢



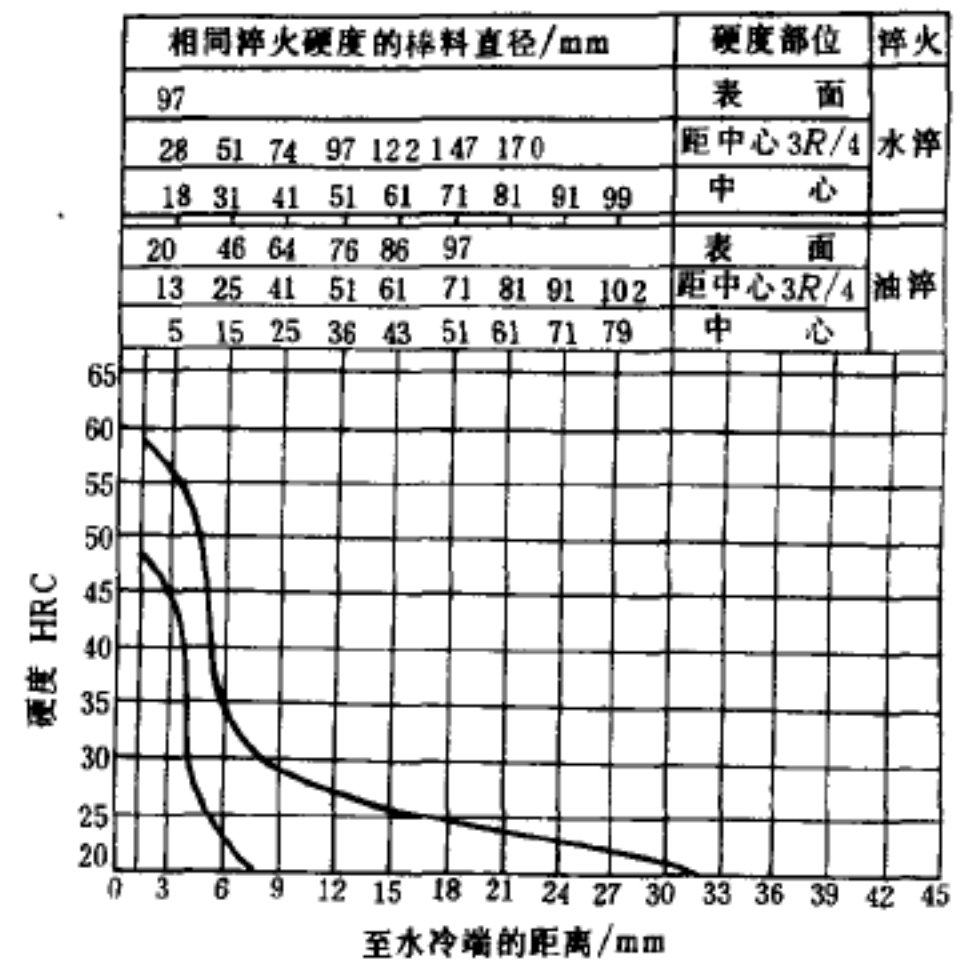
表图 5.3-17 25 钢



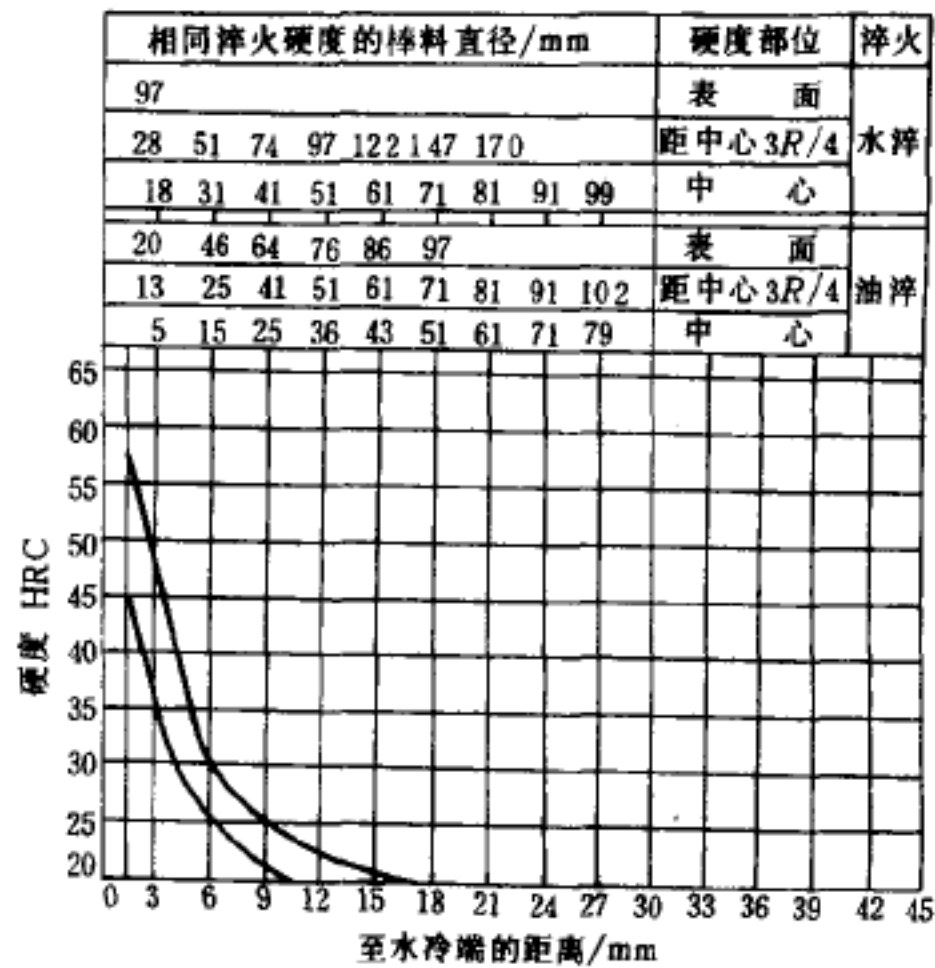
表图 5.3-18 30 钢



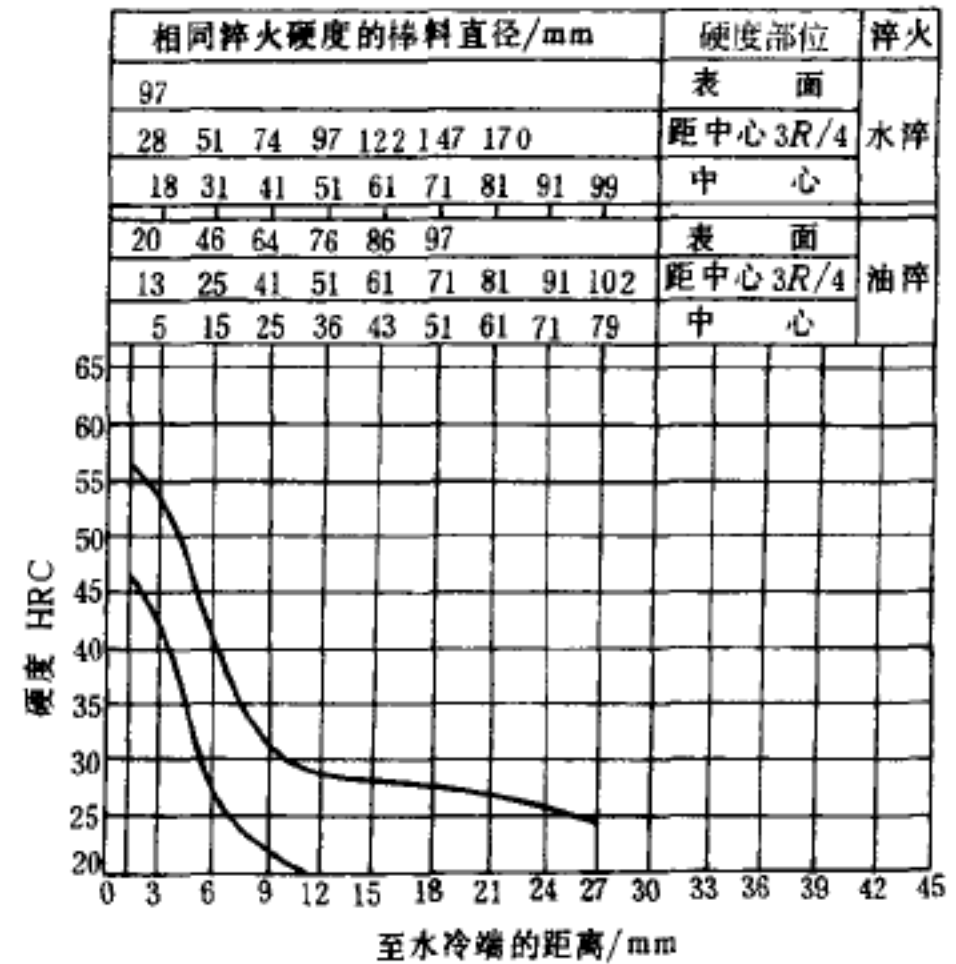
表图 5.3-19 35 钢



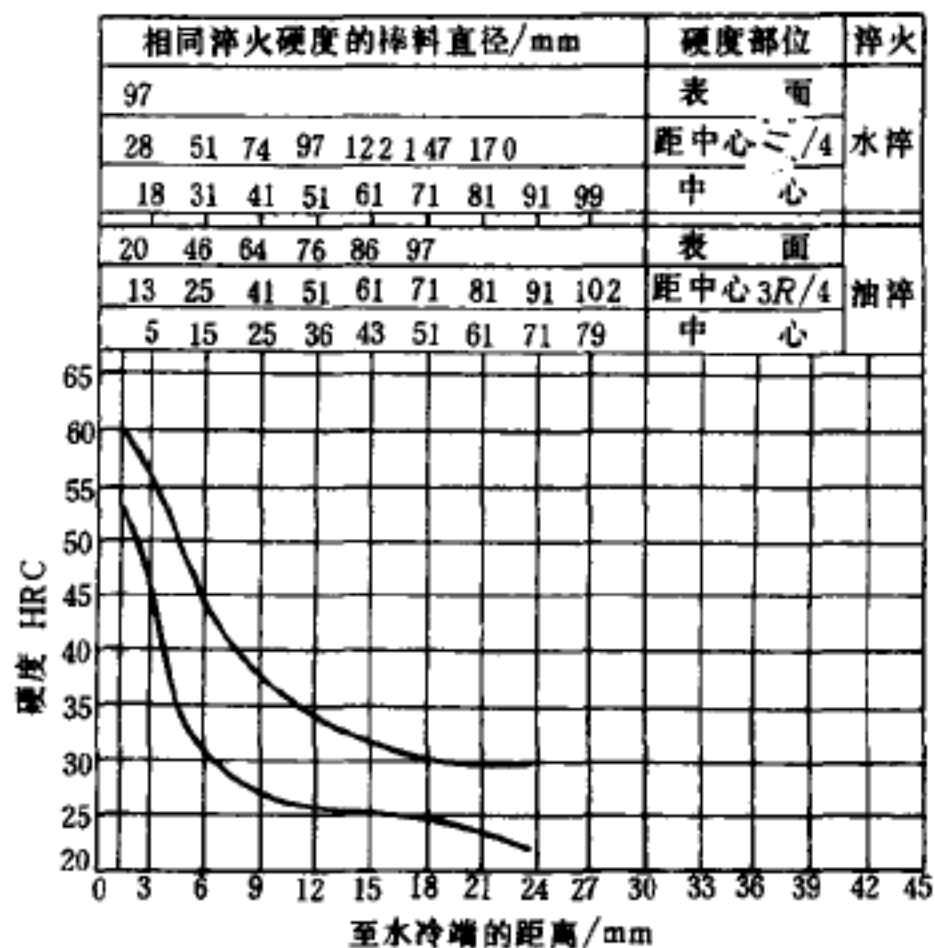
表图 5.3-20 40 钢



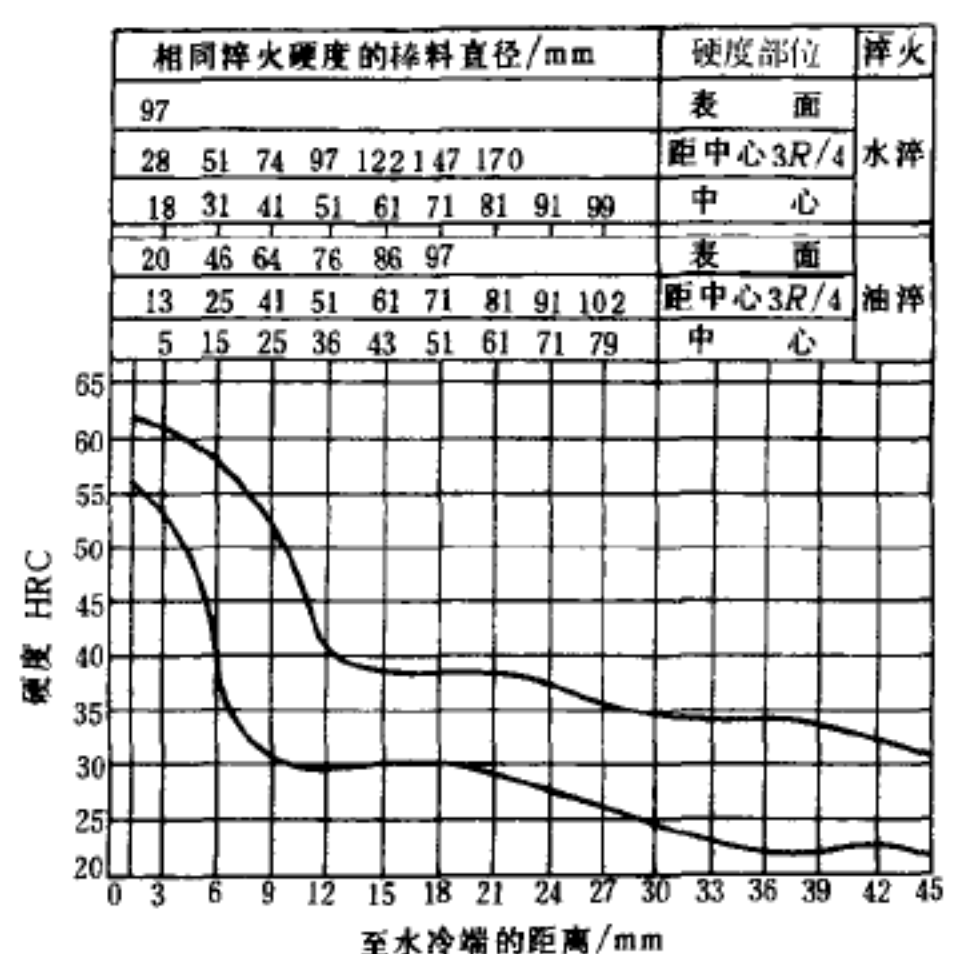
表图 5.3-21 45 钢



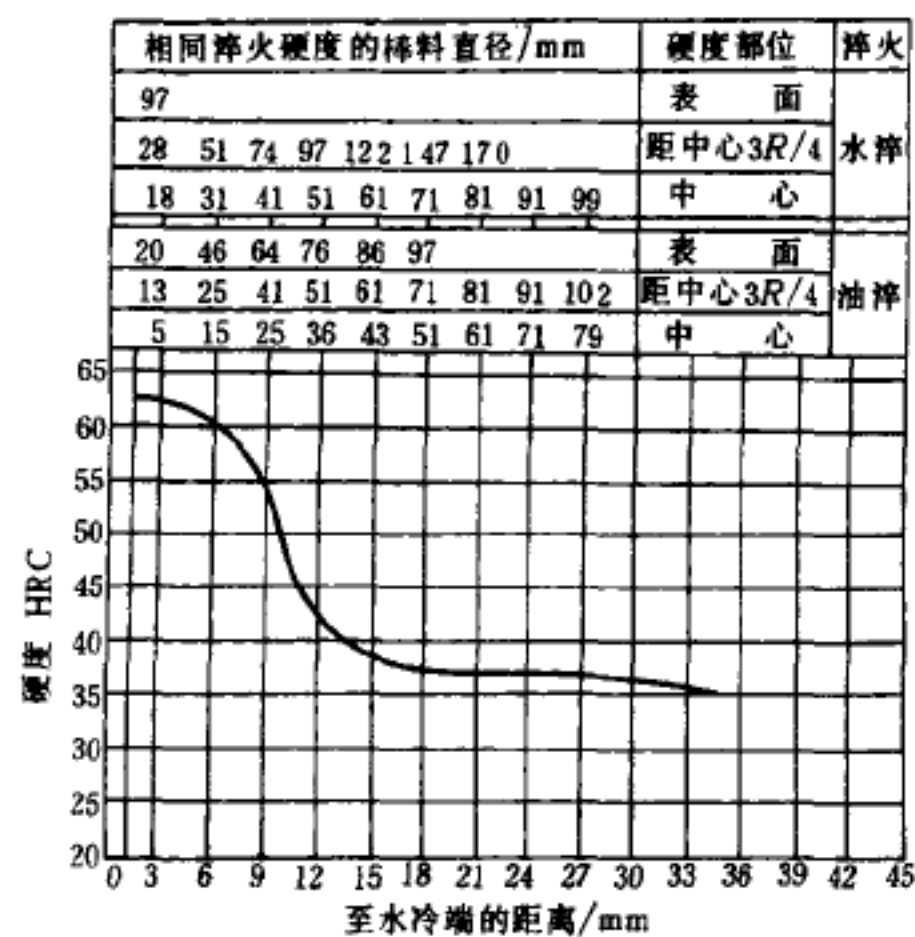
表图 5.3-22 50 钢



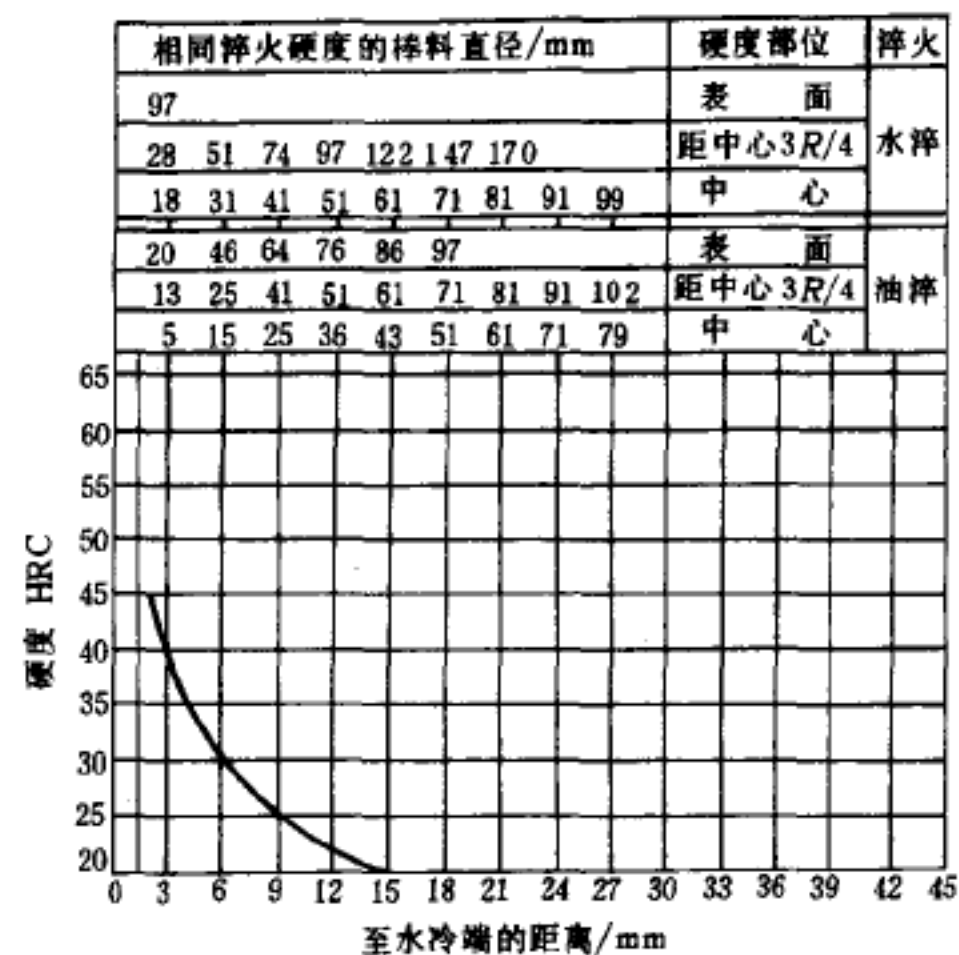
表图 5.3-23 55 钢



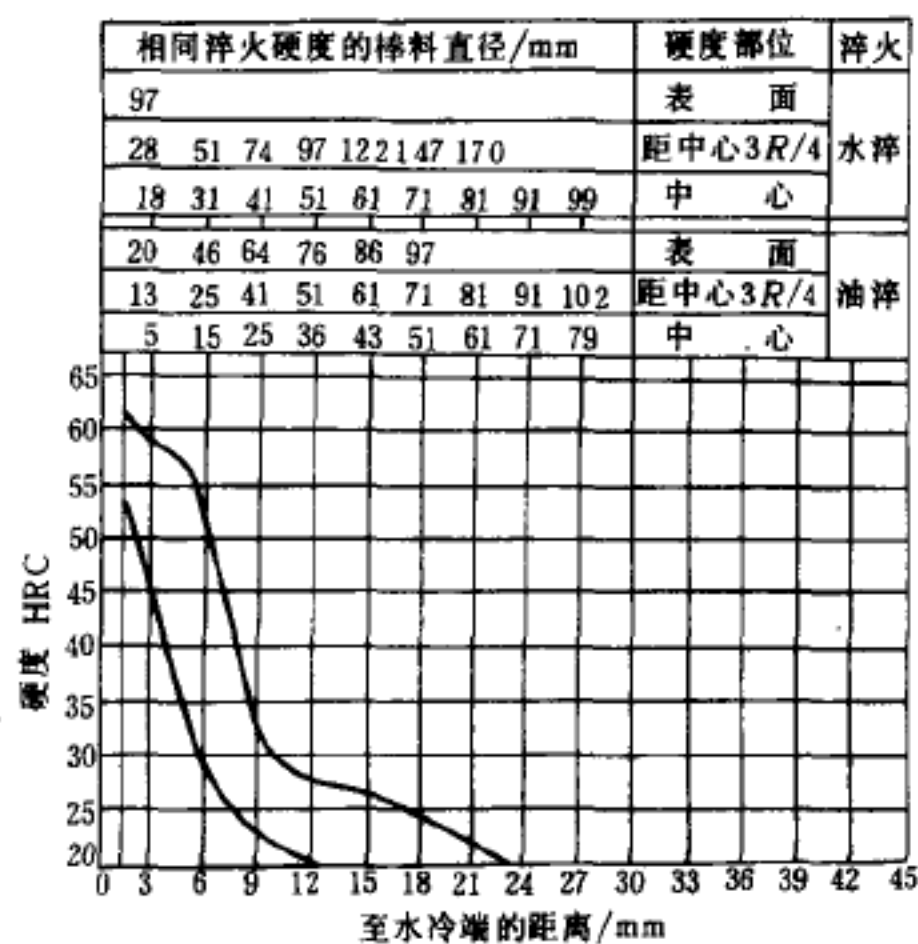
表图 5.3-24 60 钢



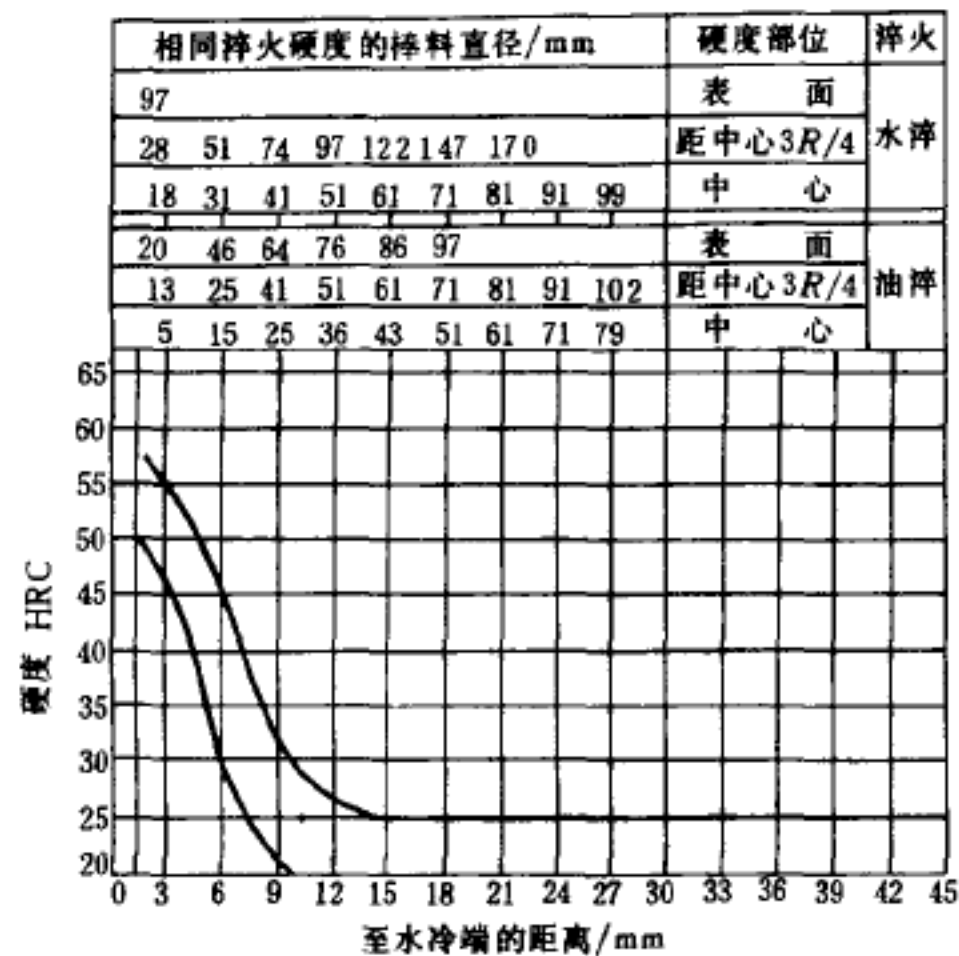
表图 5.3-25 65 钢



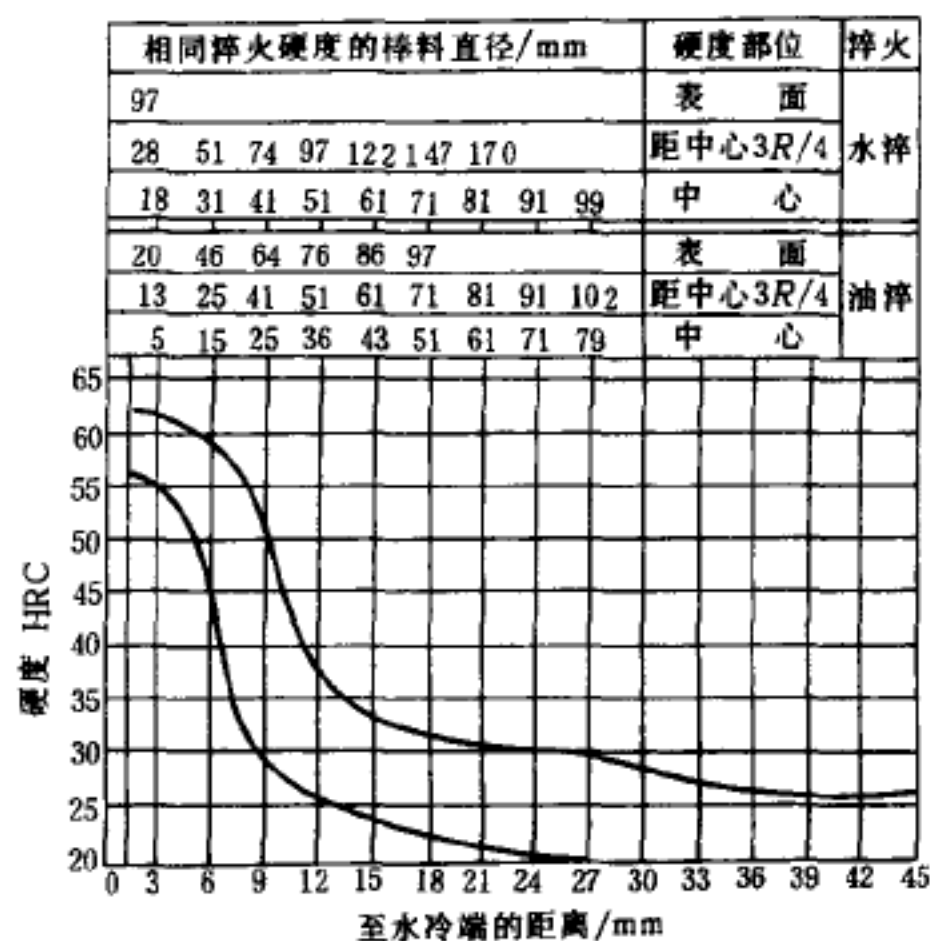
表图 5.3-26 20Mn 钢



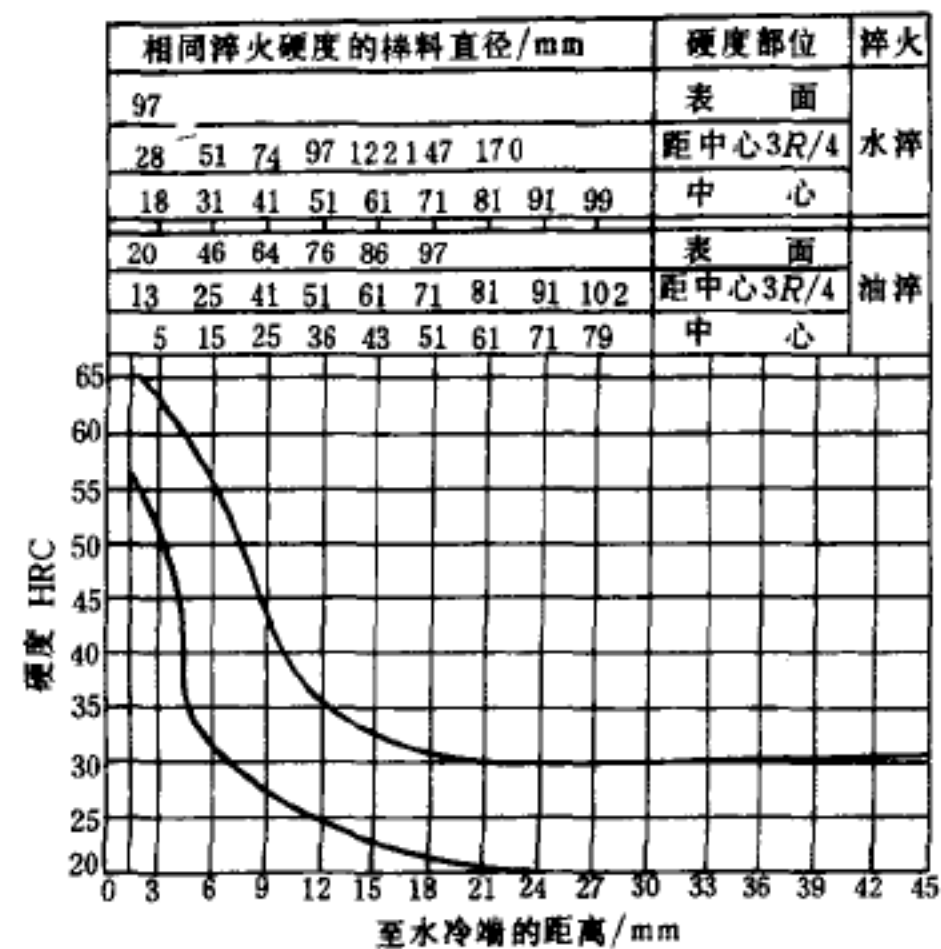
表图 5.3-27 30Mn 钢



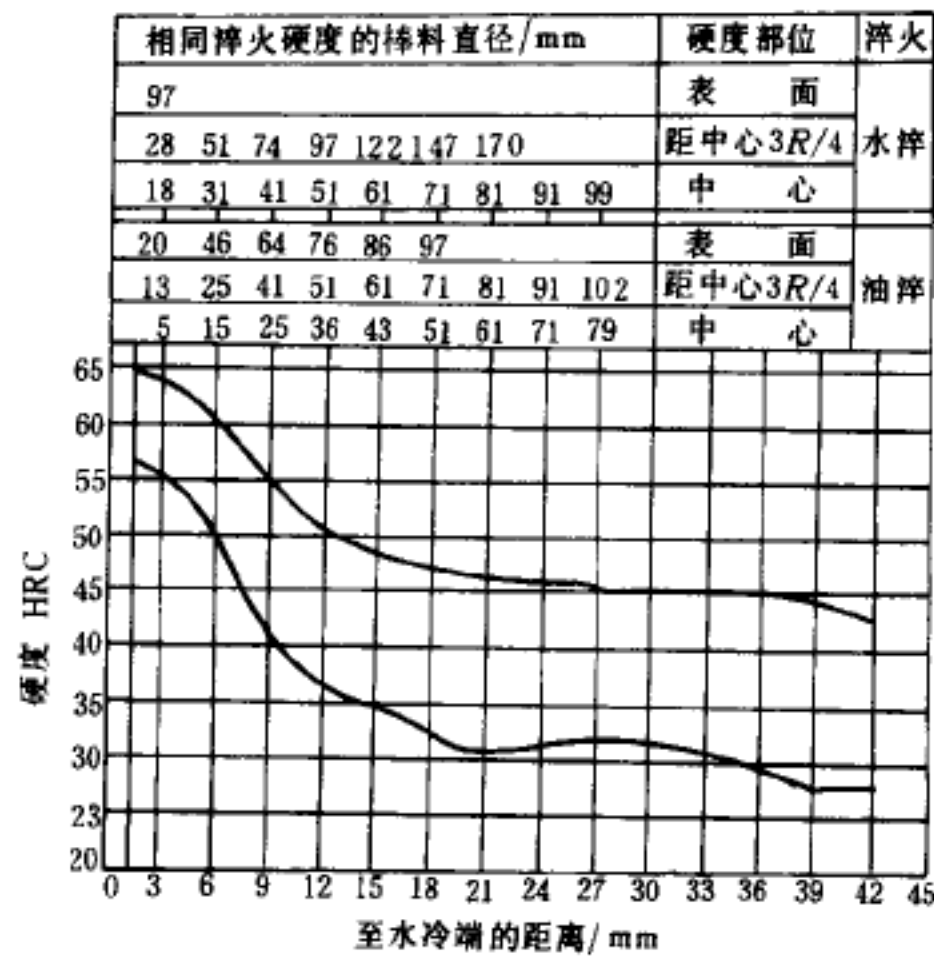
表图 5.3-28 40Mn 钢



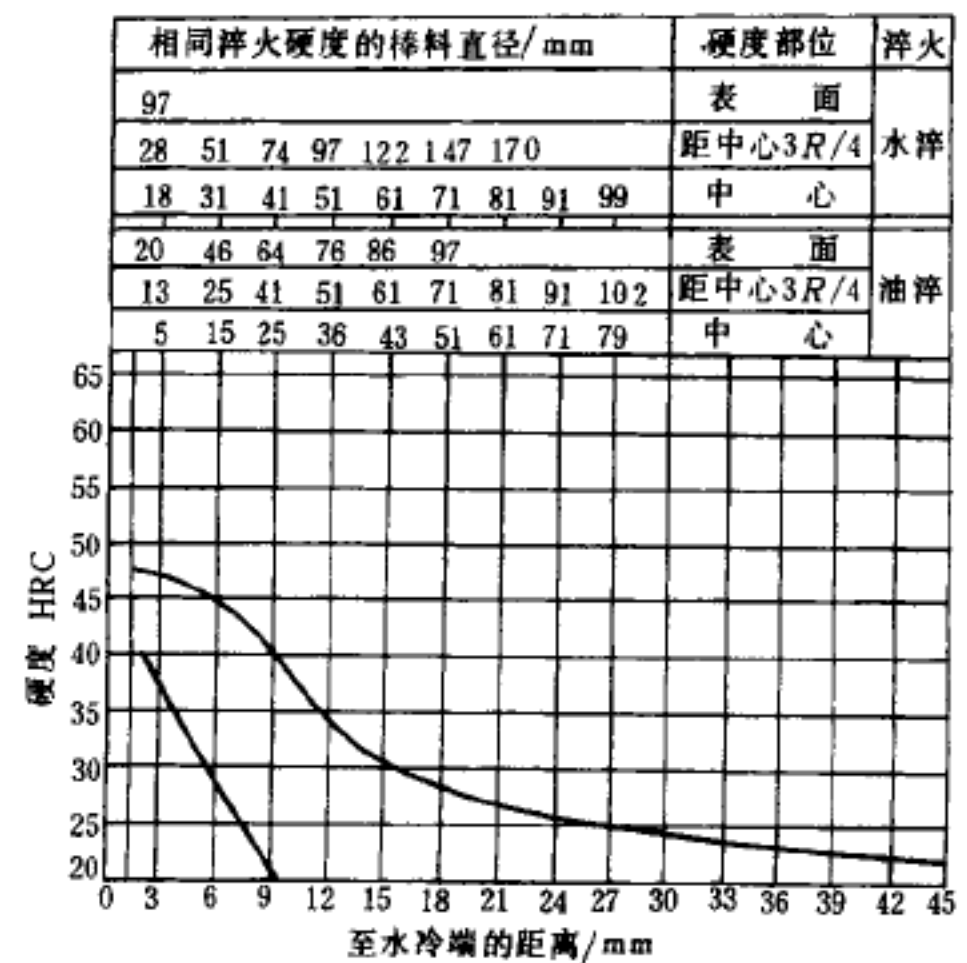
表图 5.3-29 45Mn 钢



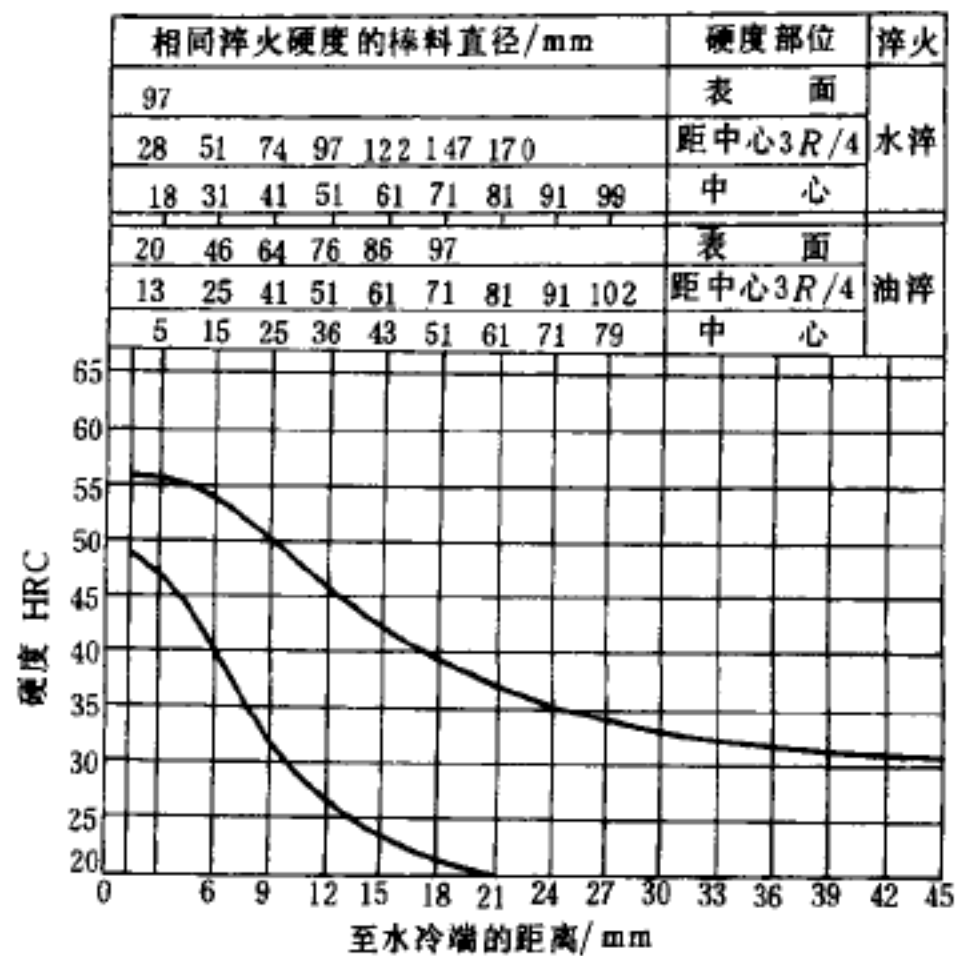
表图 5.3-30 55Mn 钢



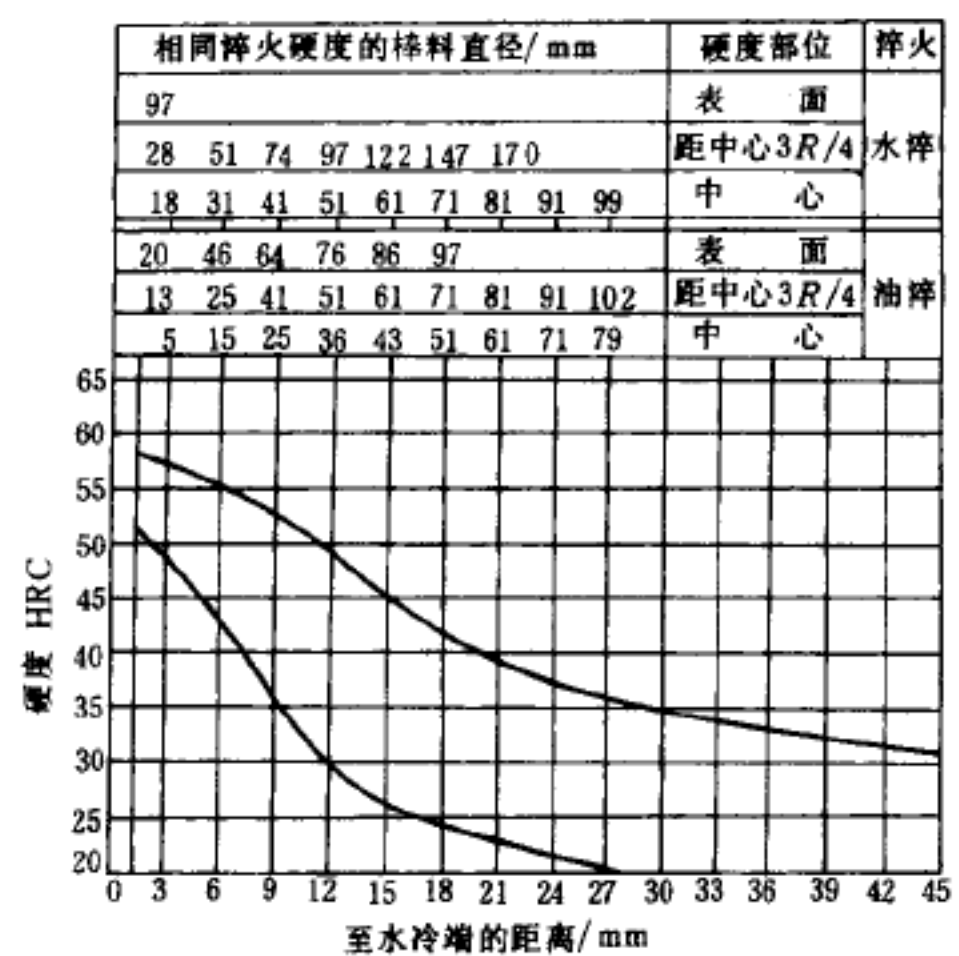
表图 5.3-31 65Mn 钢



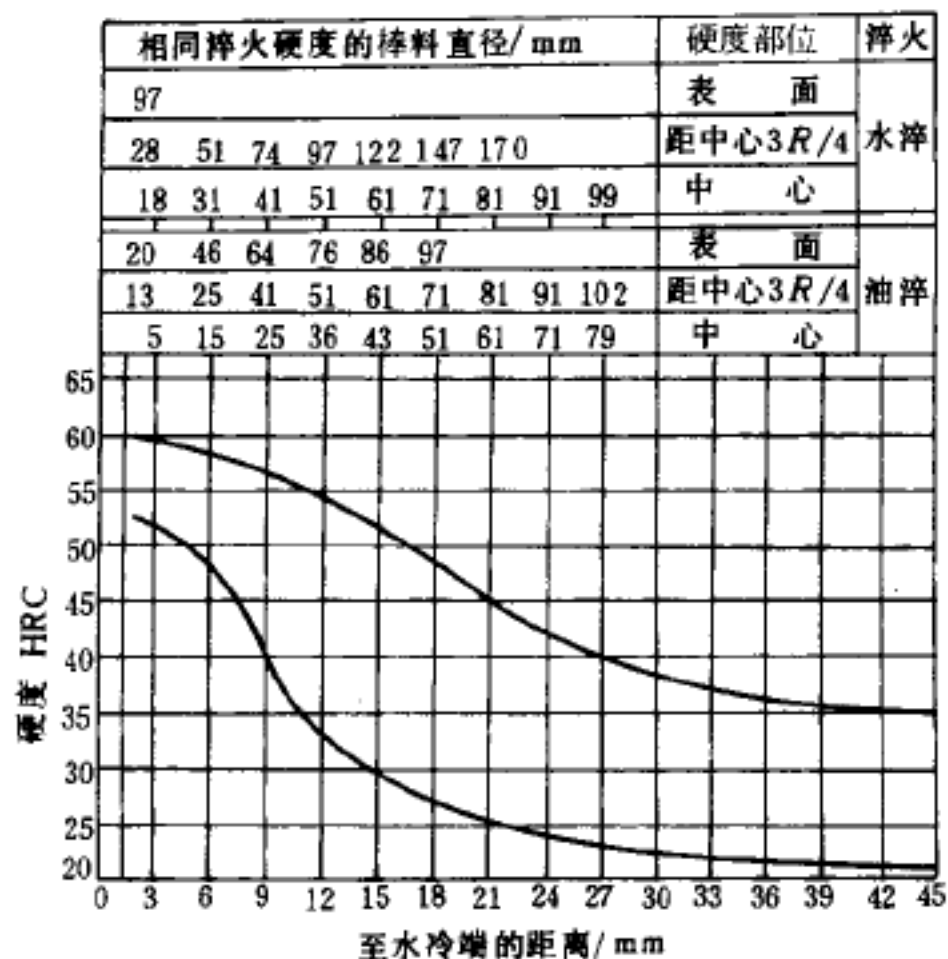
表图 5.3-32 20Mn2 钢



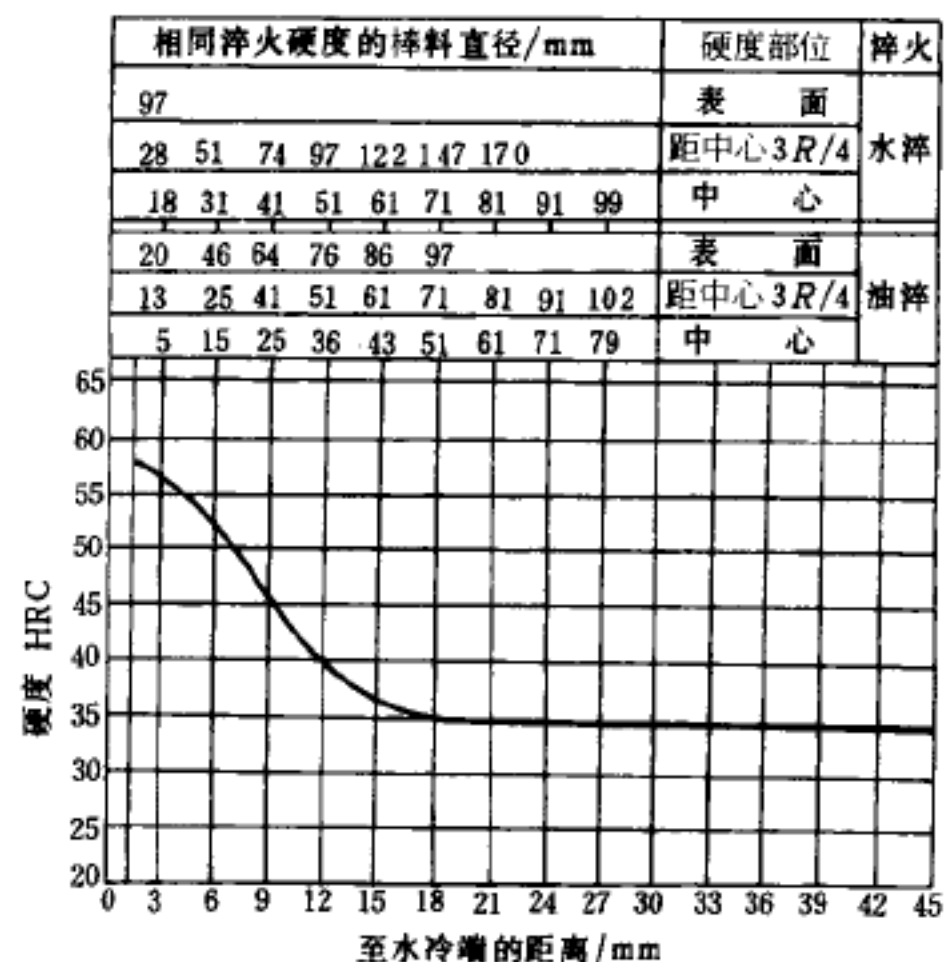
表图 5.3-33 30Mn2 钢



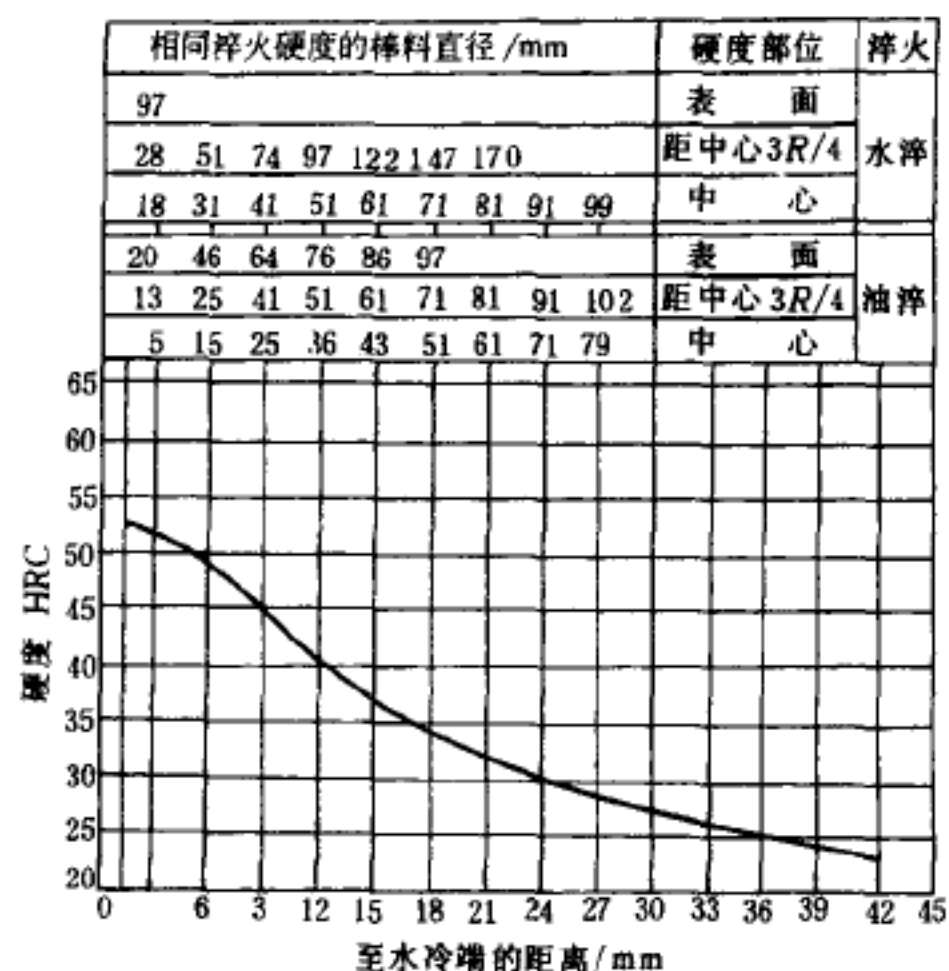
表图 5.3-34 35Mn2 钢



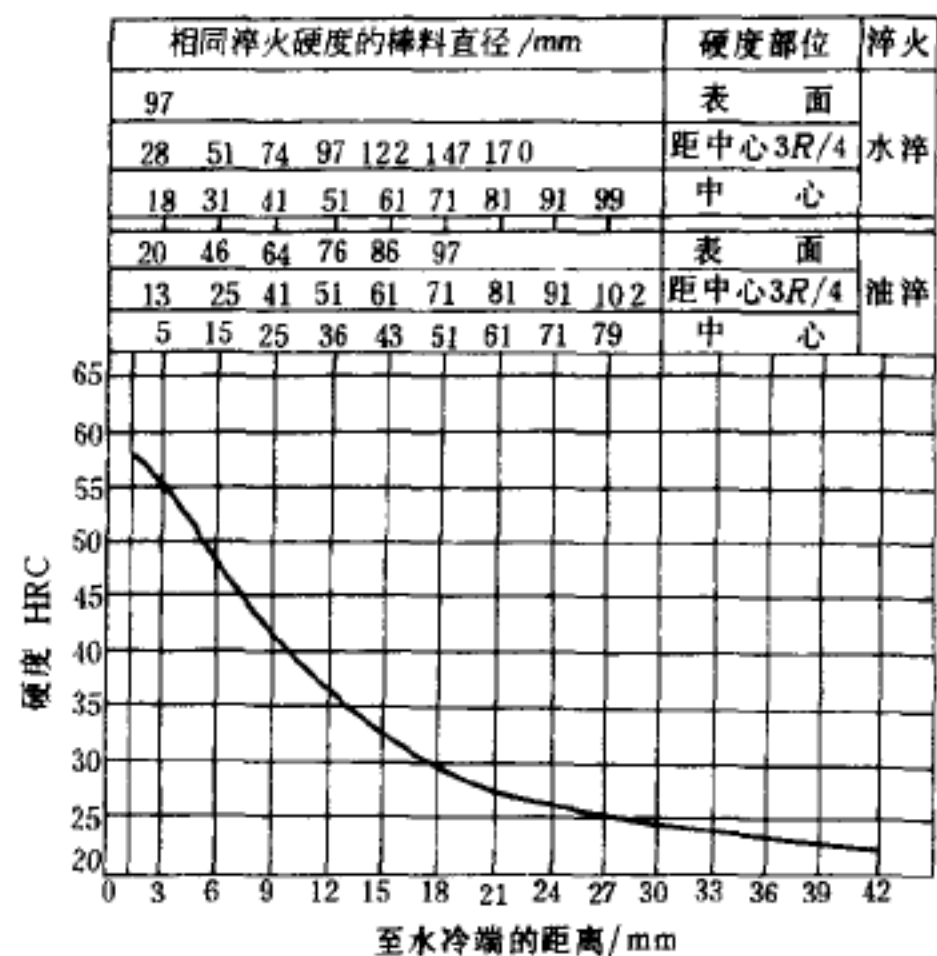
表图 5.3-35 40Mn2 钢



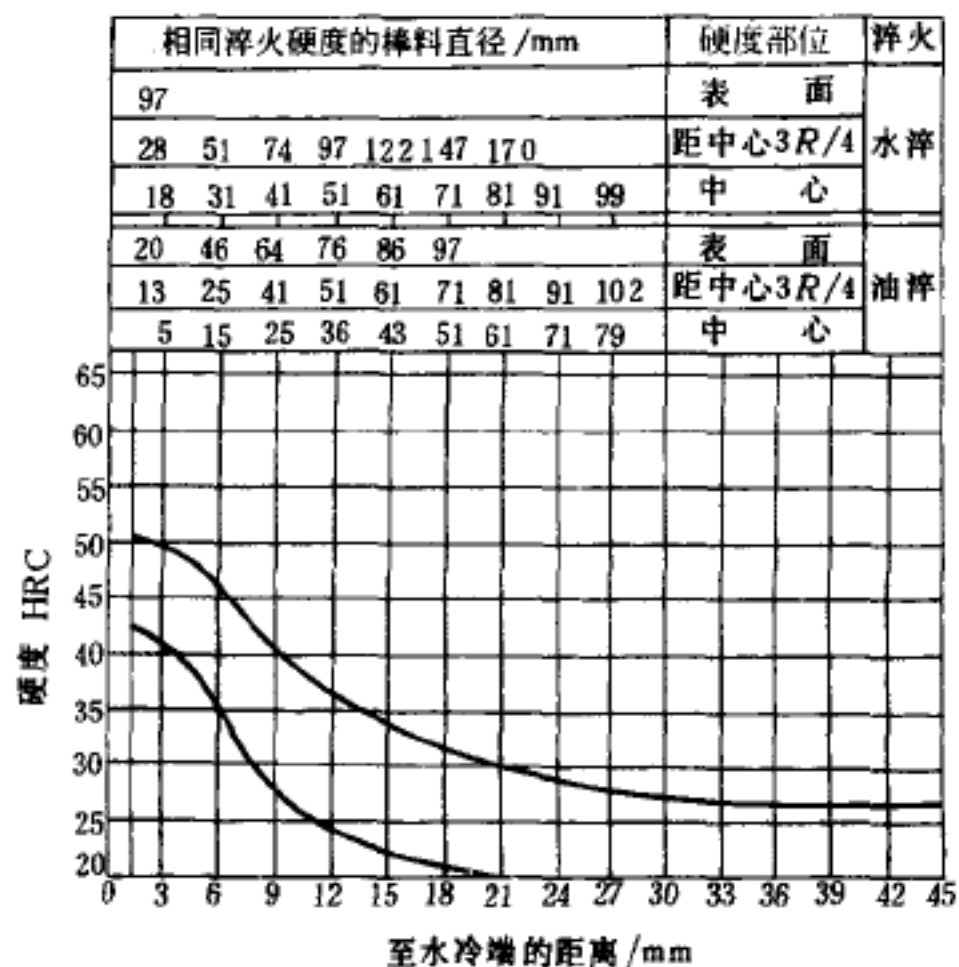
表图 5.3-36 40Mn2V 钢



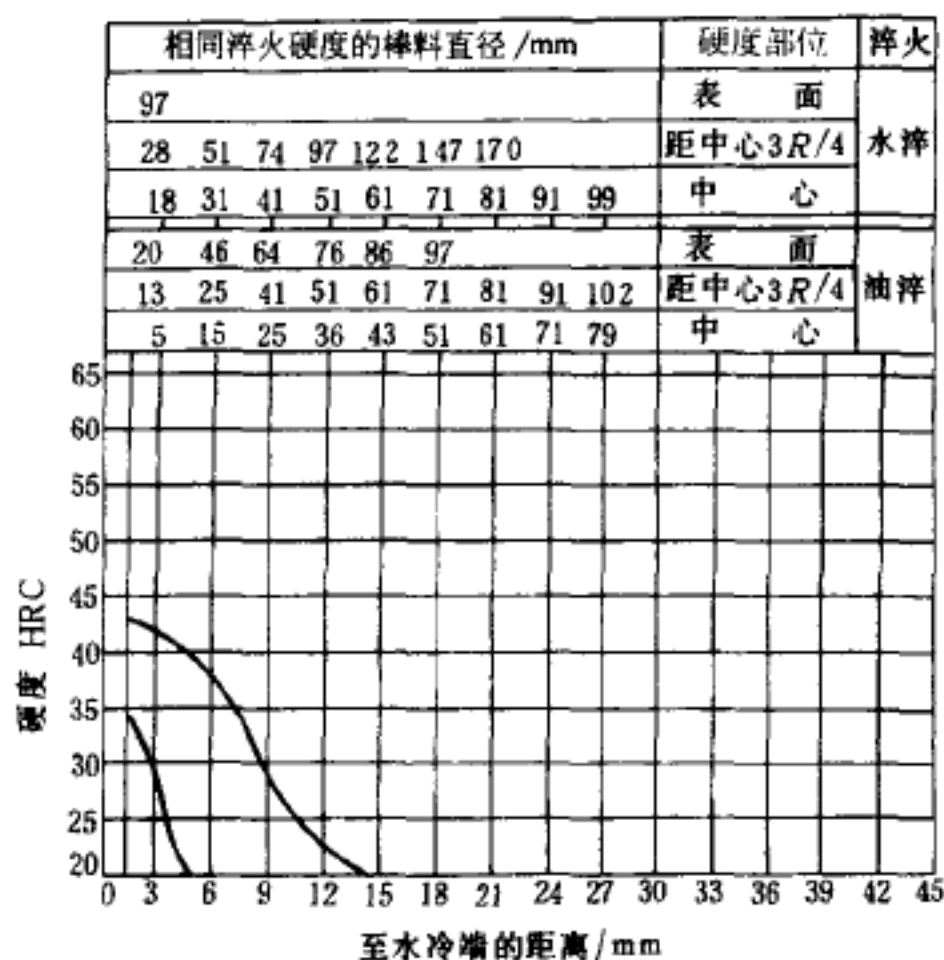
表图 5.3-37 27SiMn 钢



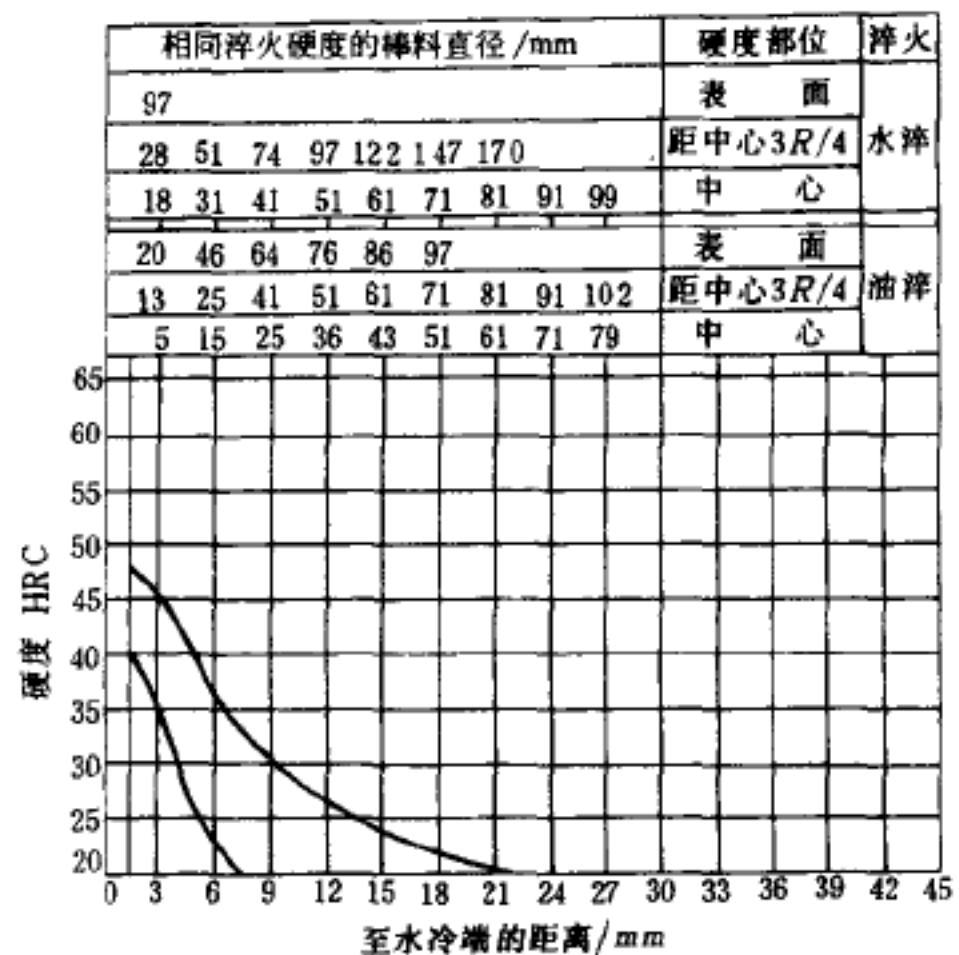
表图 5.3-38 35SiMn 钢



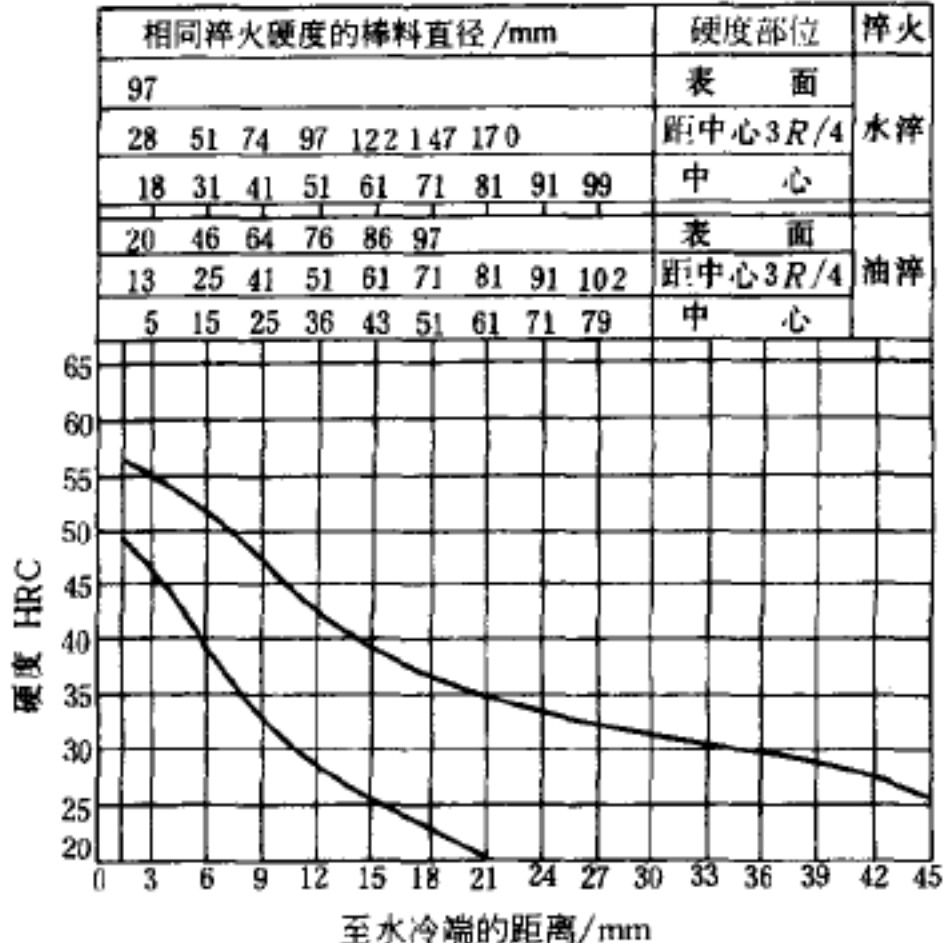
表图 5.3-39 20Si2Mn 钢



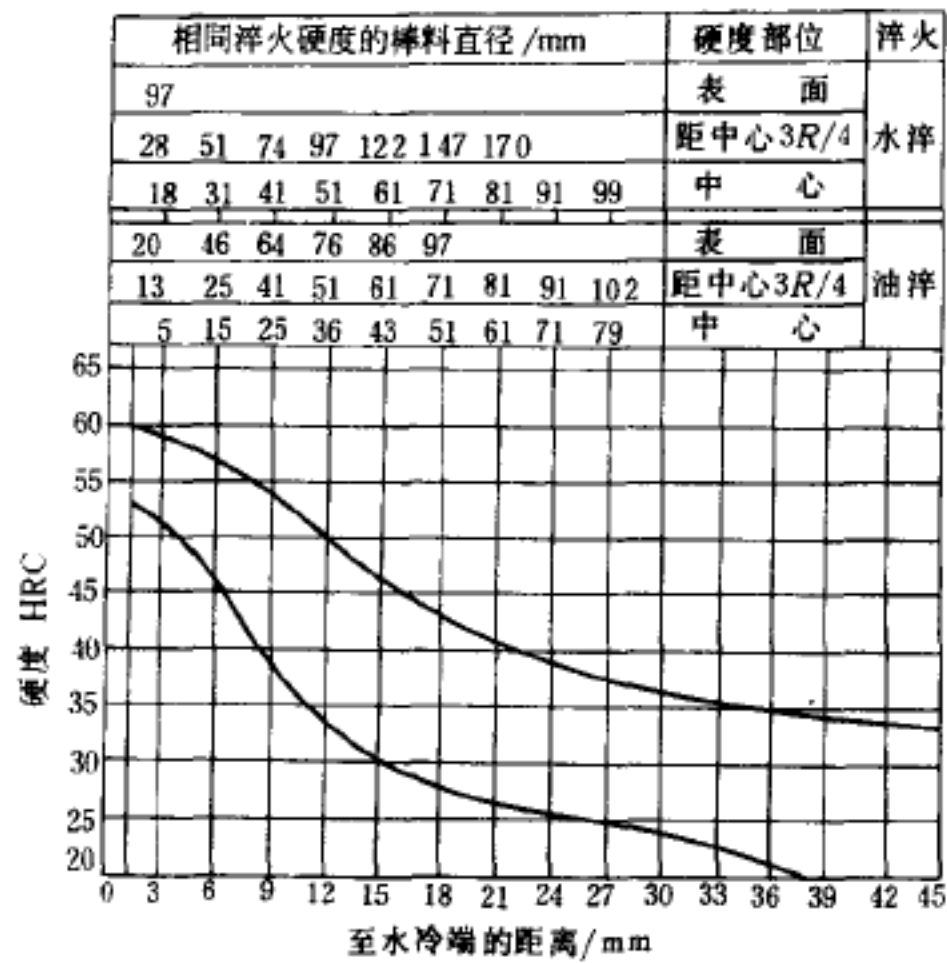
表图 5.3-40 15Cr 钢



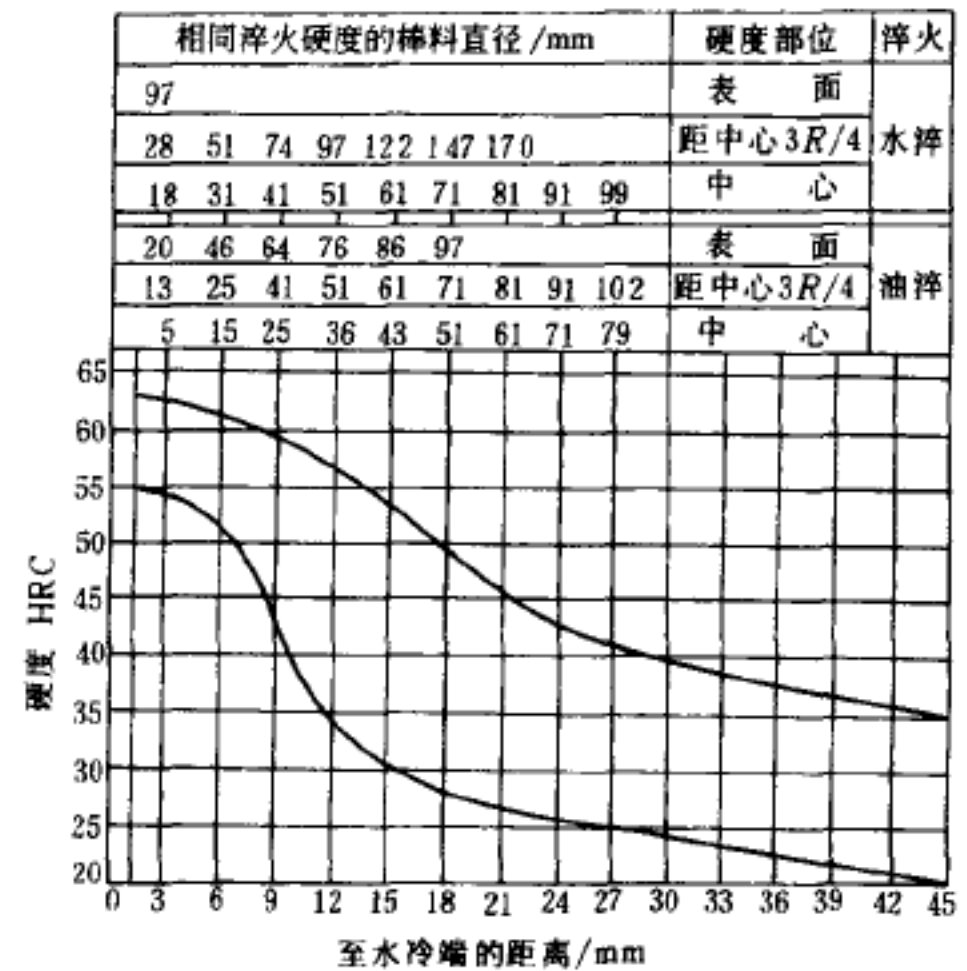
表图 5.3-41 20Cr 钢



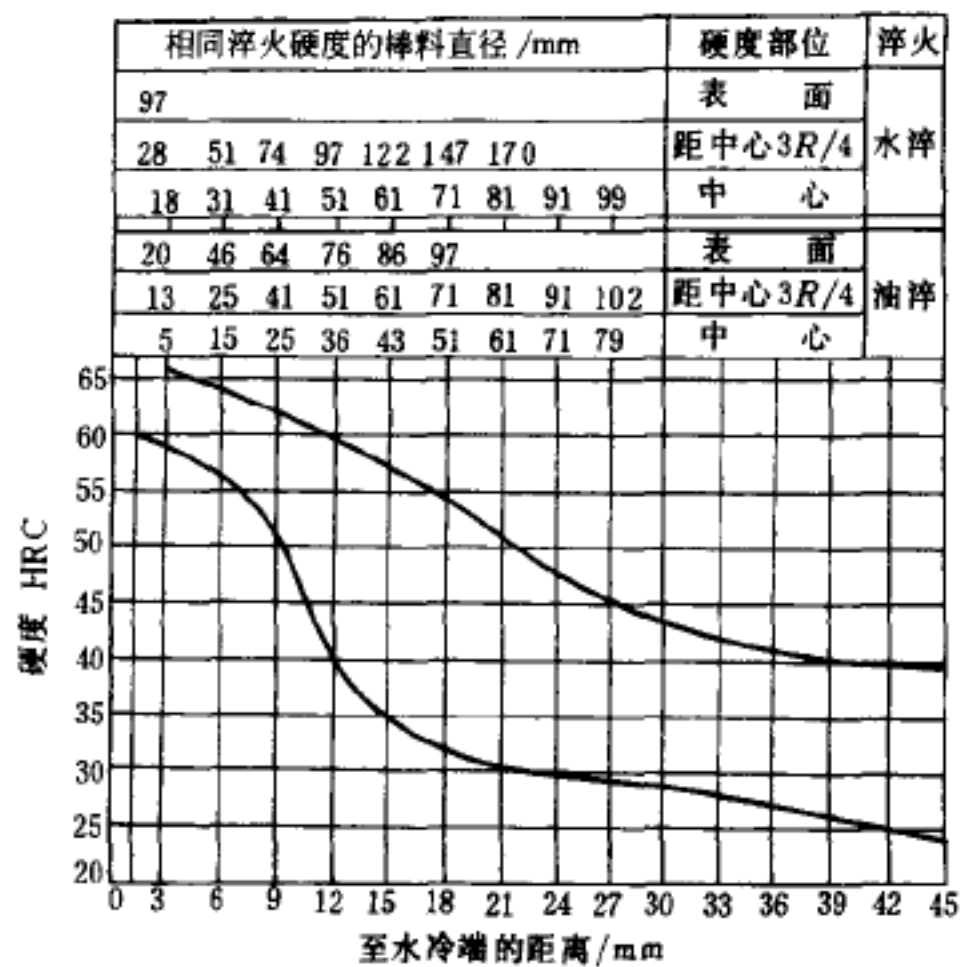
表图 5.3-42 30Cr 钢



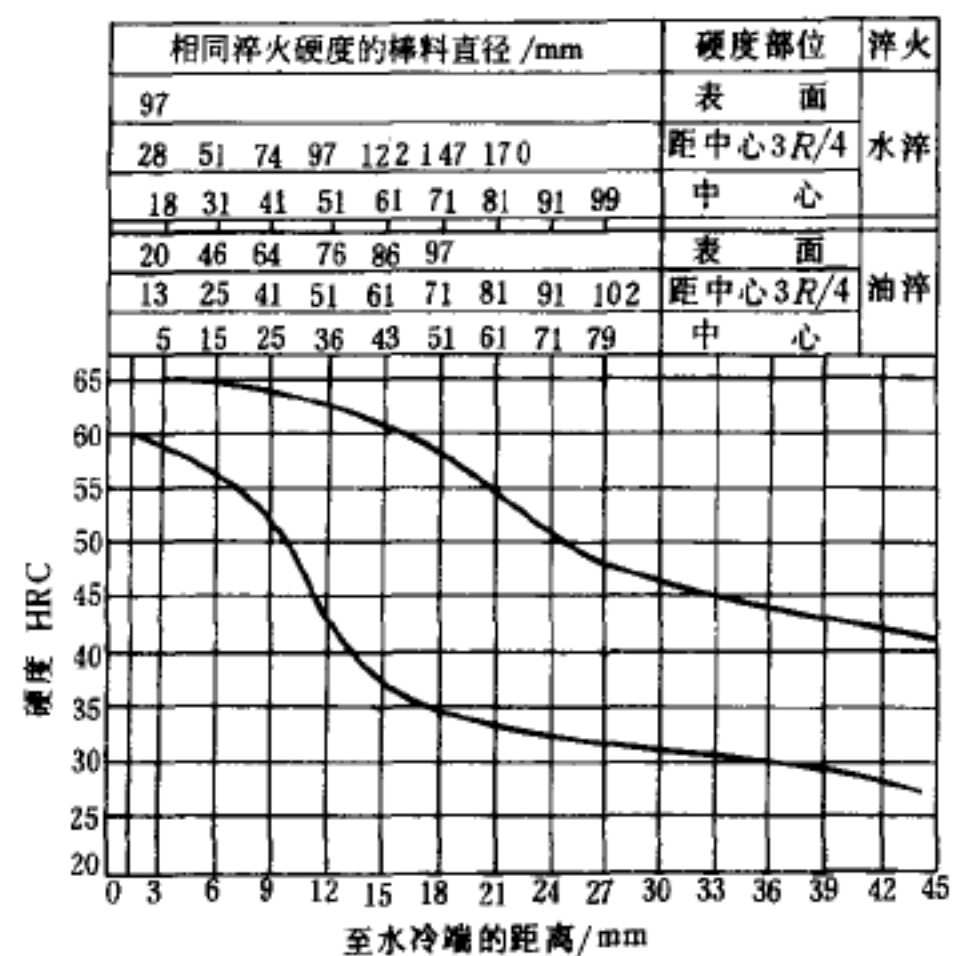
表图 5.3-43 40Cr 钢



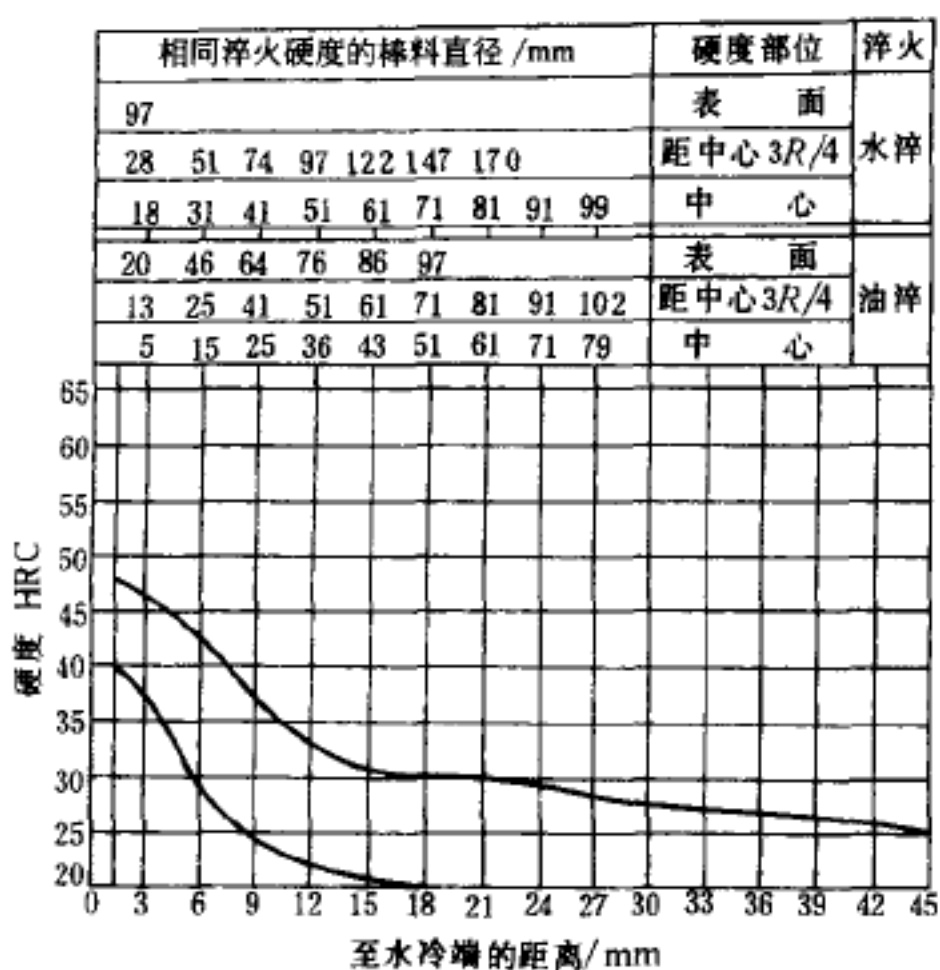
表图 5.3-44 45Cr 钢



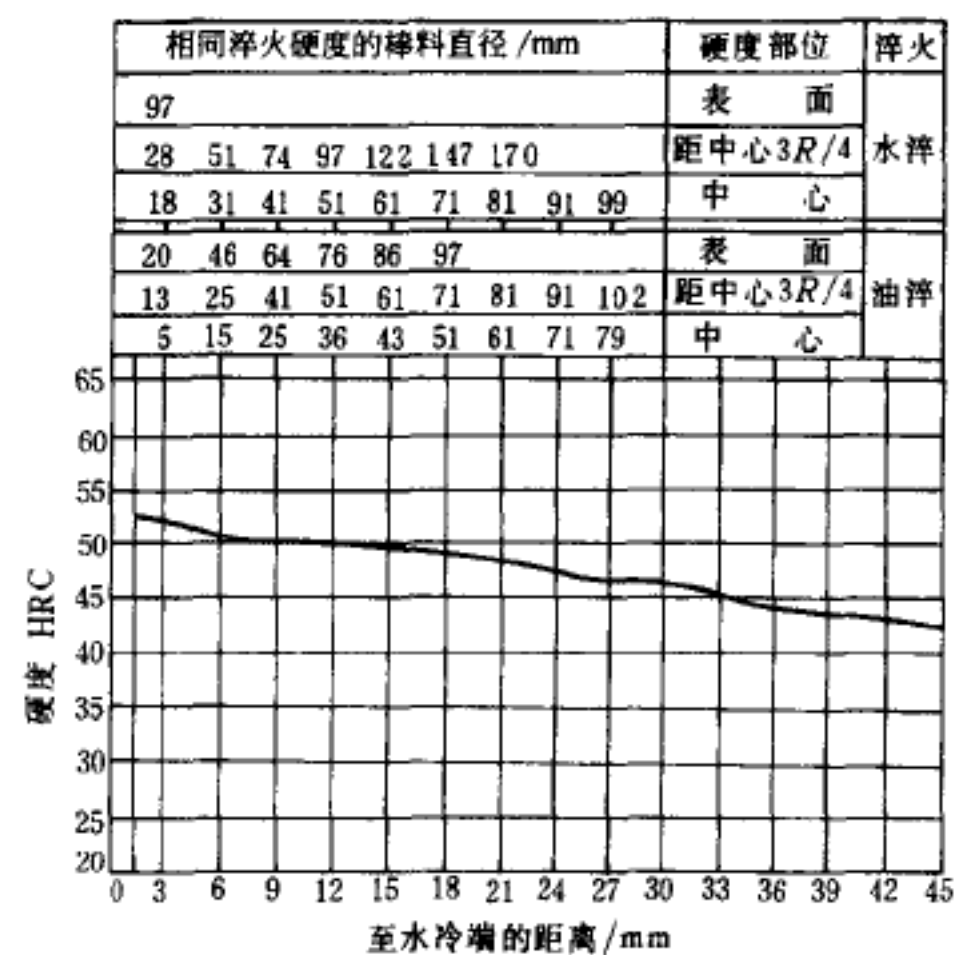
表图 5.3-45 50Cr 钢



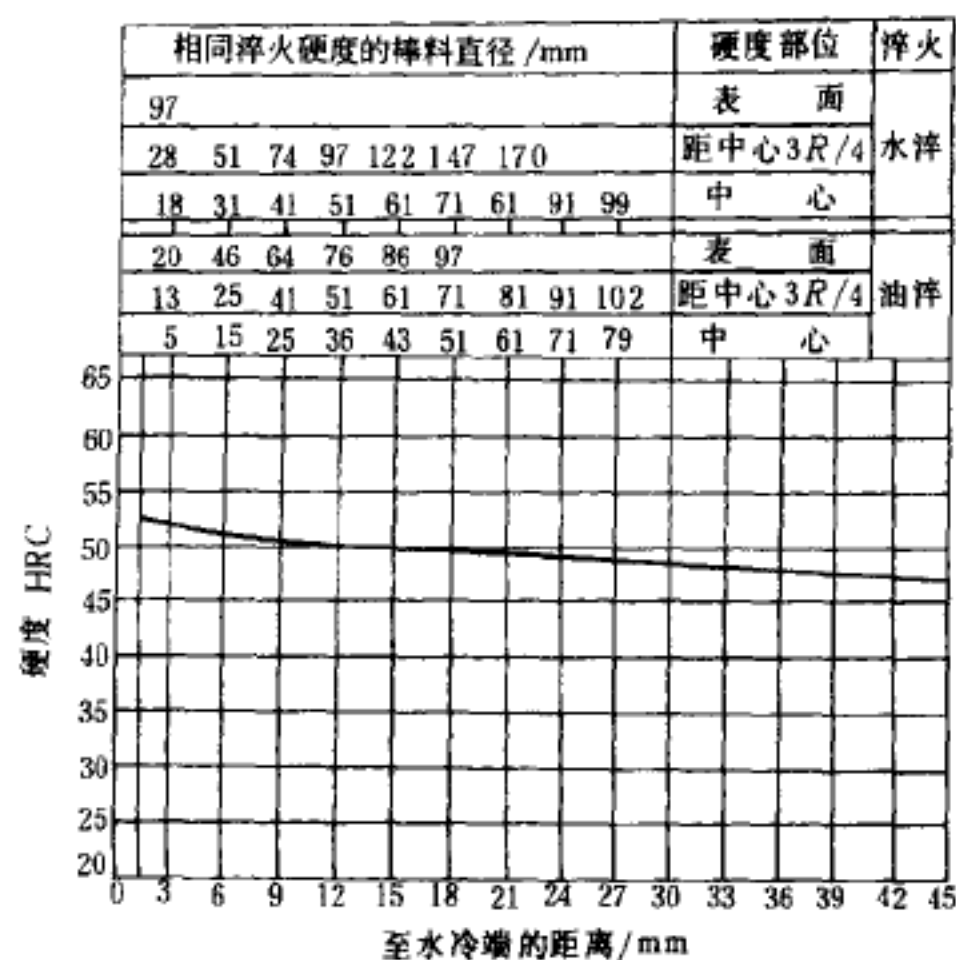
表图 5.3-46 55Cr 钢



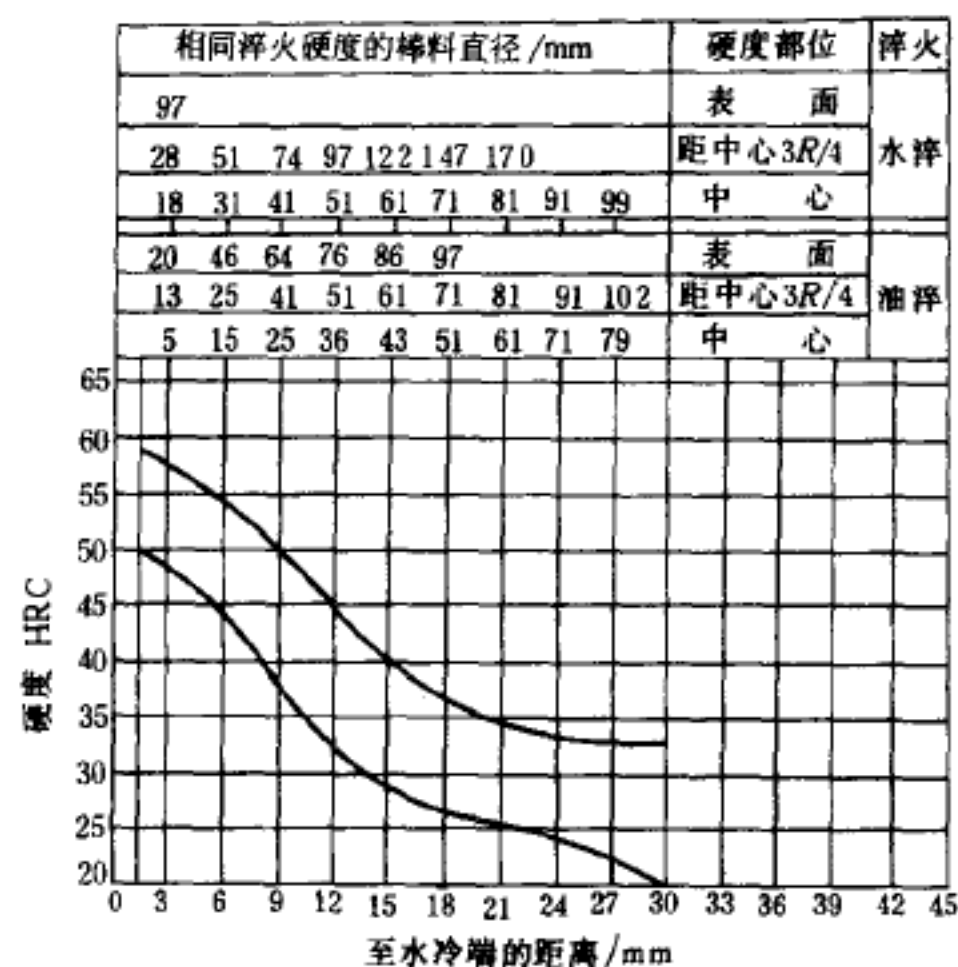
表图 5.3-47 20CrV 钢



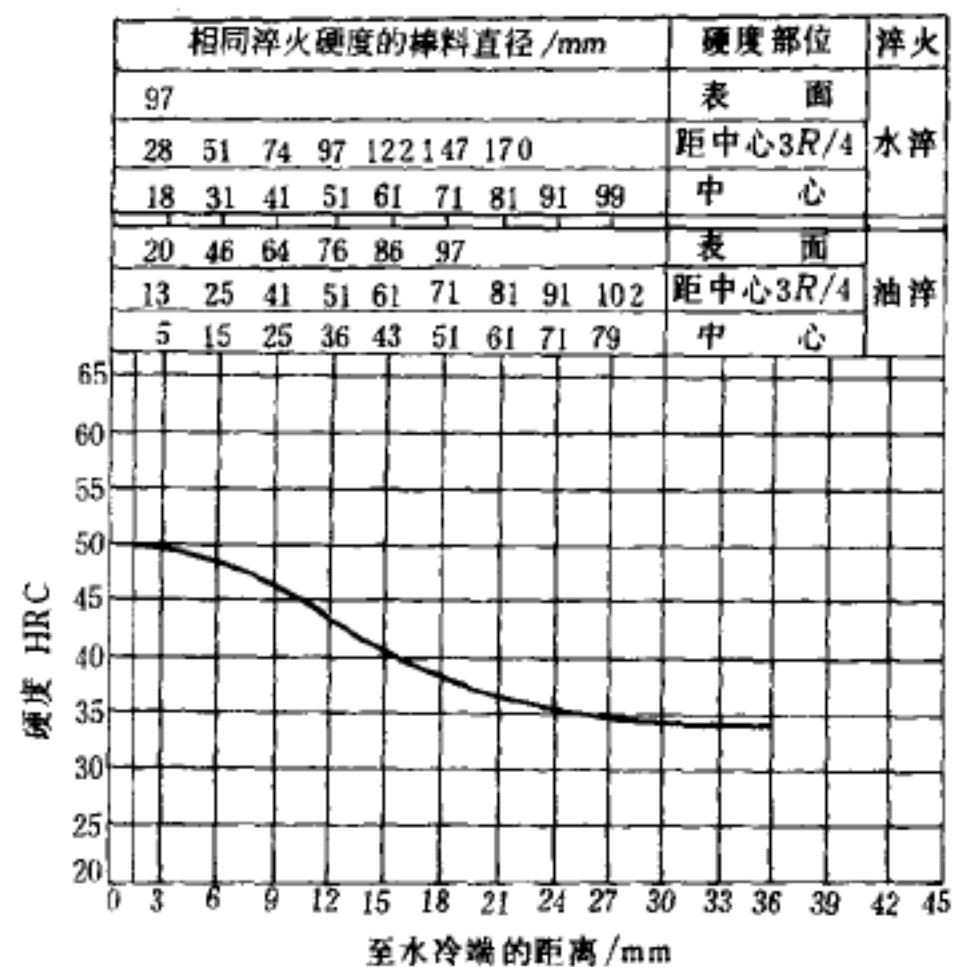
表图 5.3-48 40CrV 钢



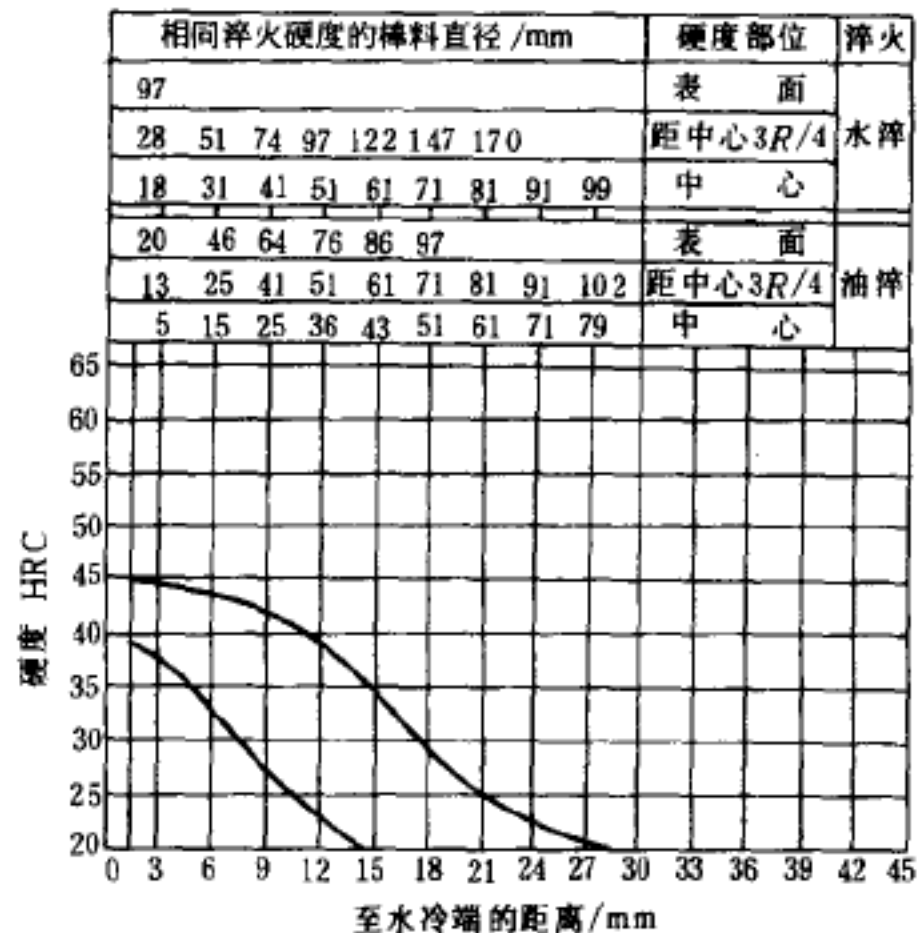
表图 5.3-49 30CrMnSi 钢



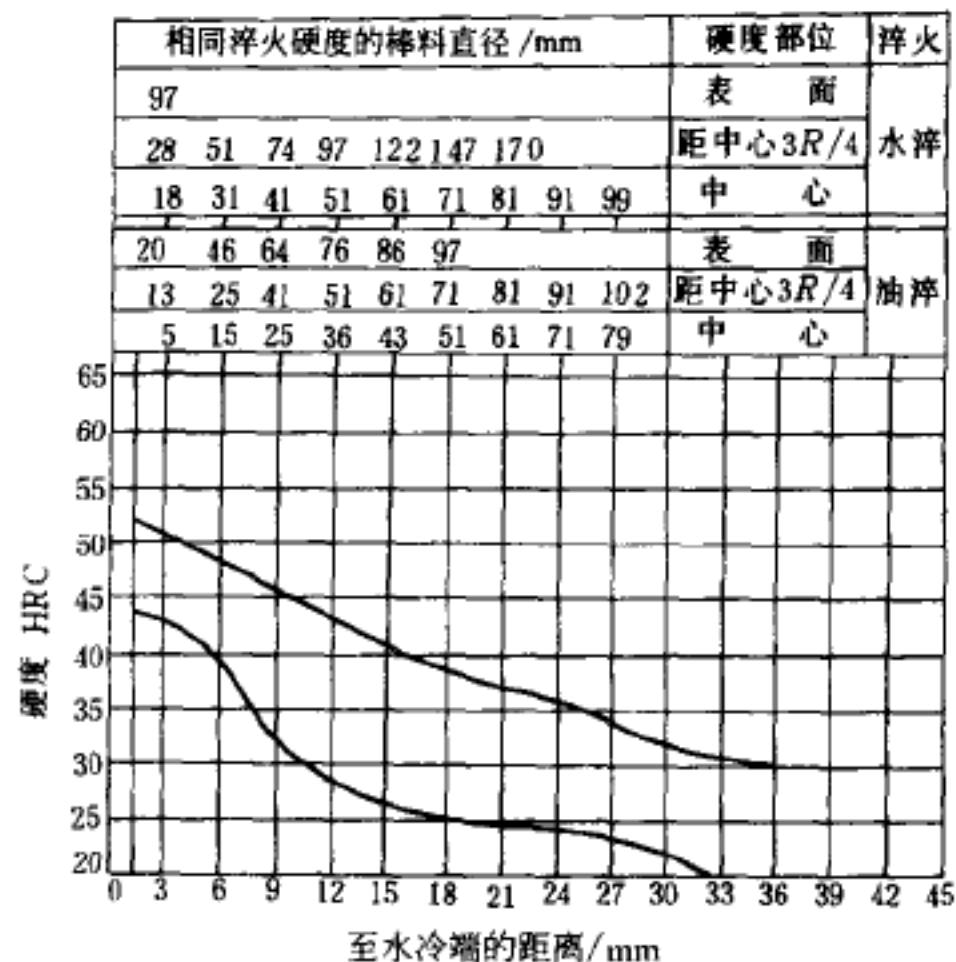
表图 5.3-50 20CrMnSiMo 钢



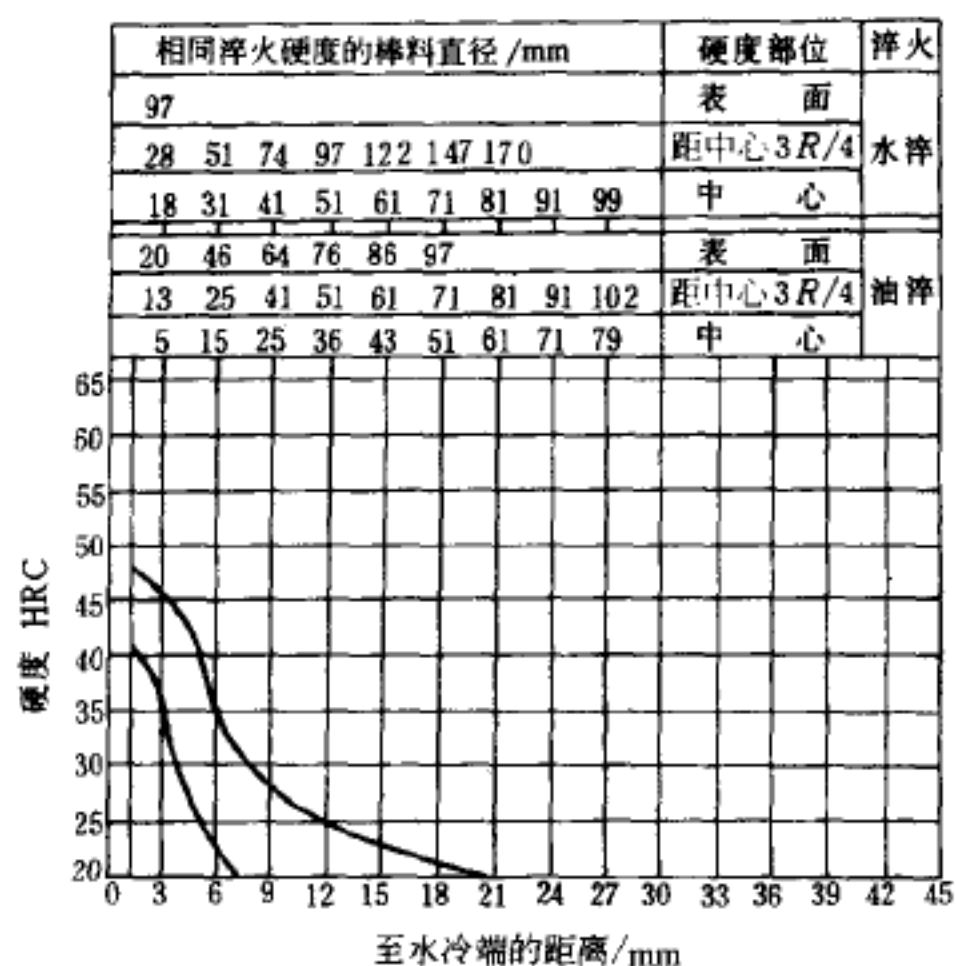
表图 5.3-51 20Cr2Mn2SiMo 钢



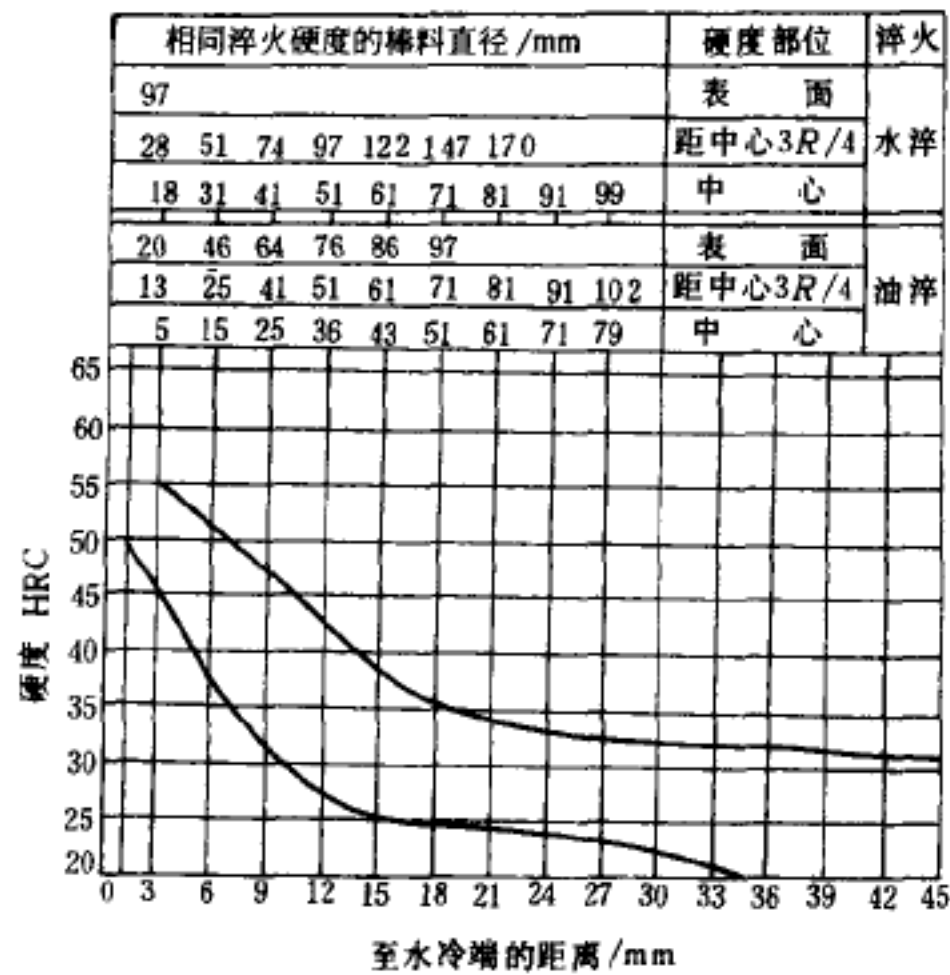
表图 5.3-52 18CrMnTi 钢



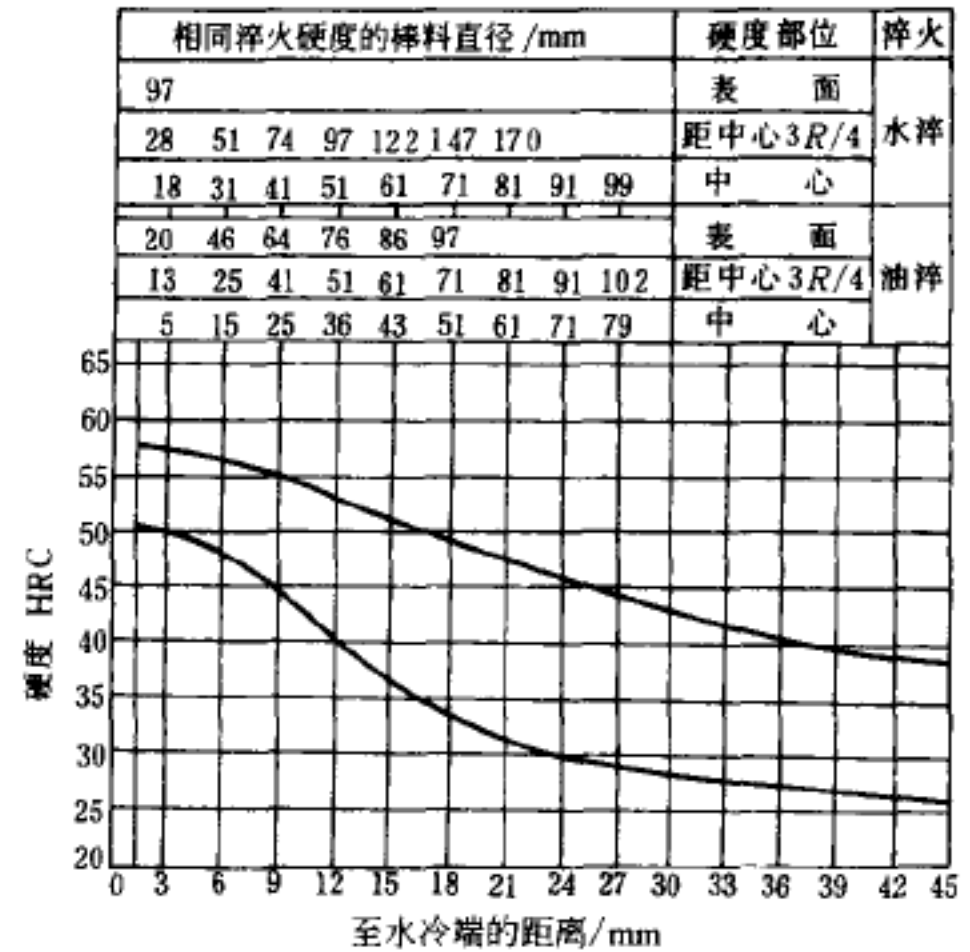
表图 5.3-53 30CrMnTi 钢



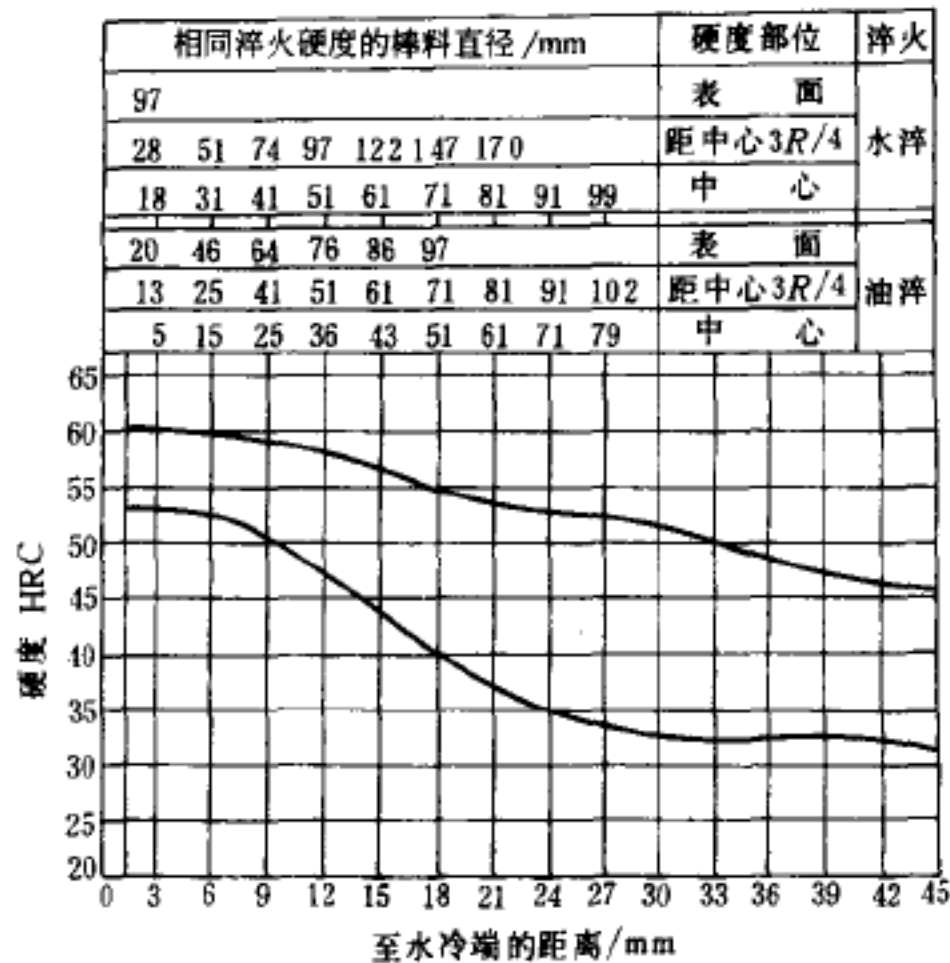
表图 5.3-54 20CrMo 钢



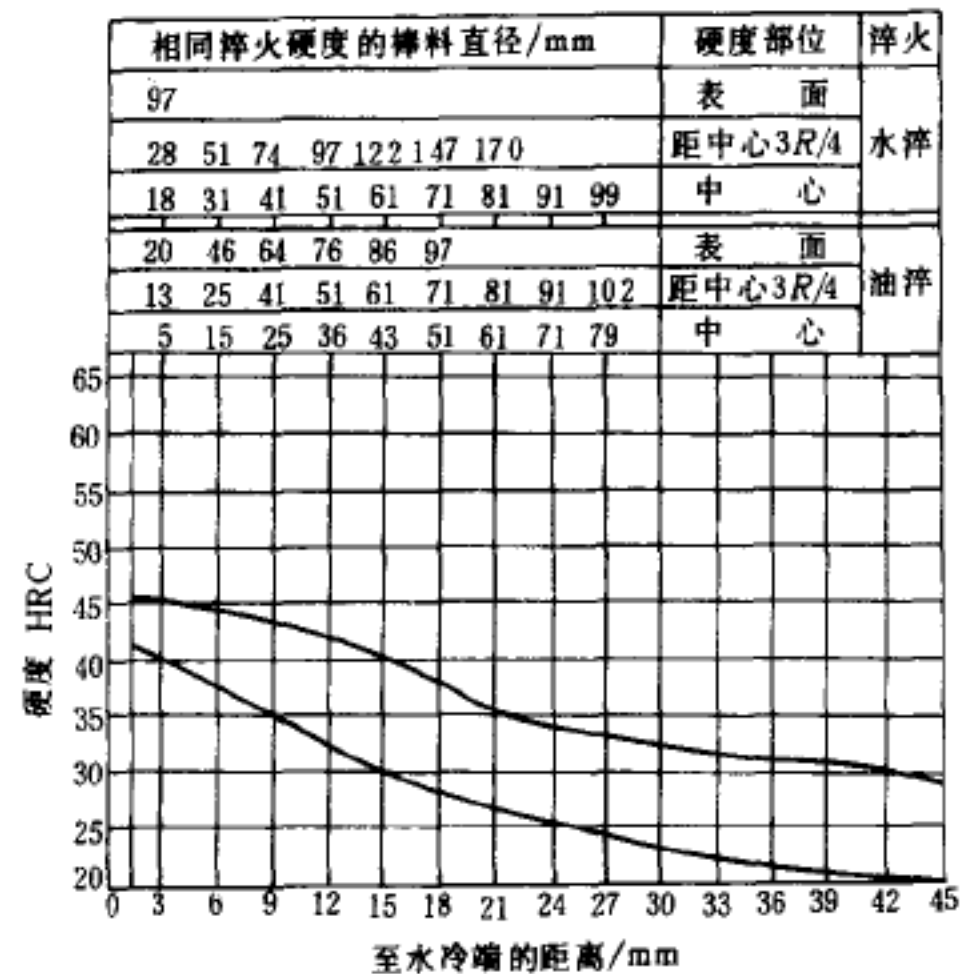
表图 5.3-55 30CrMo 钢



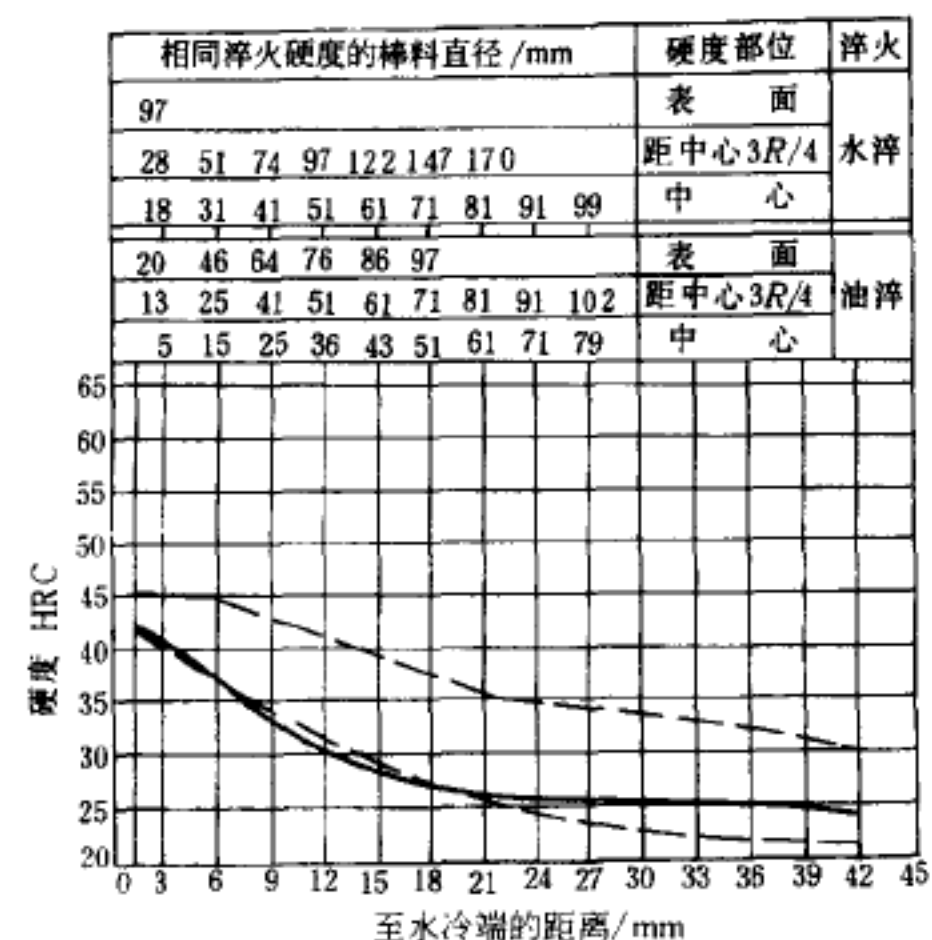
表图 5.3-56 35CrMo 钢



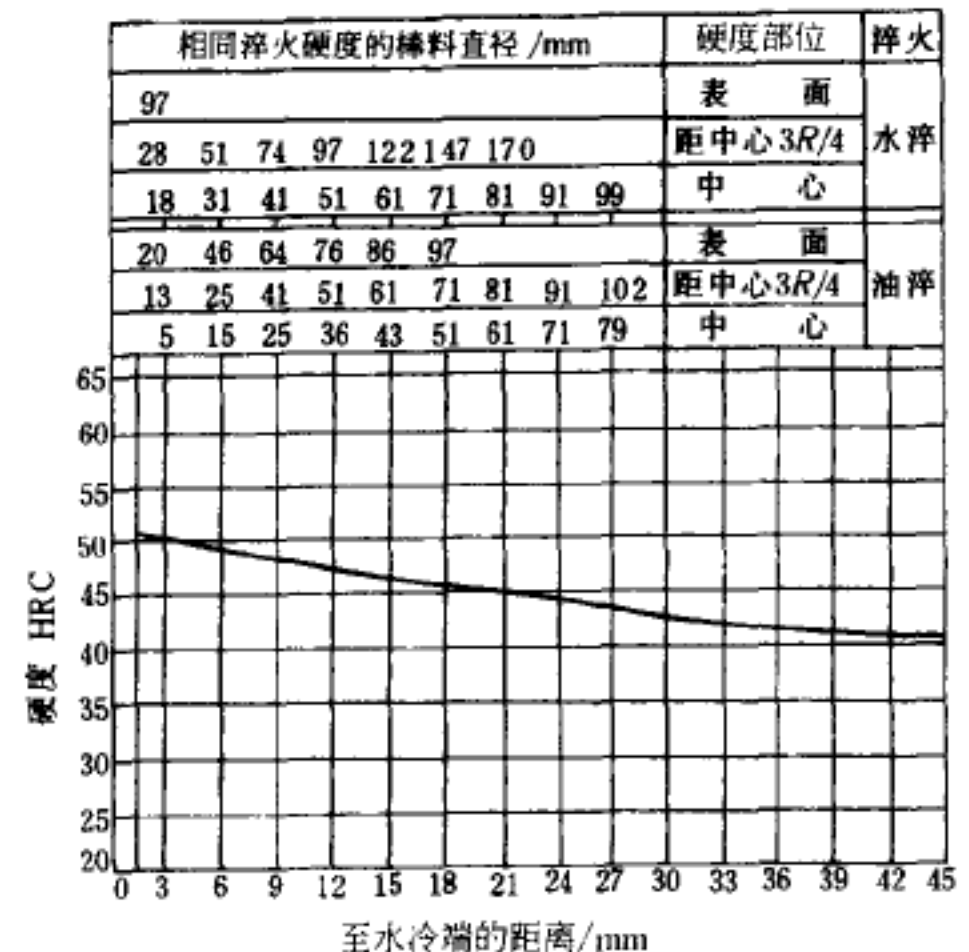
表图 5.3-57 42CrMo 钢



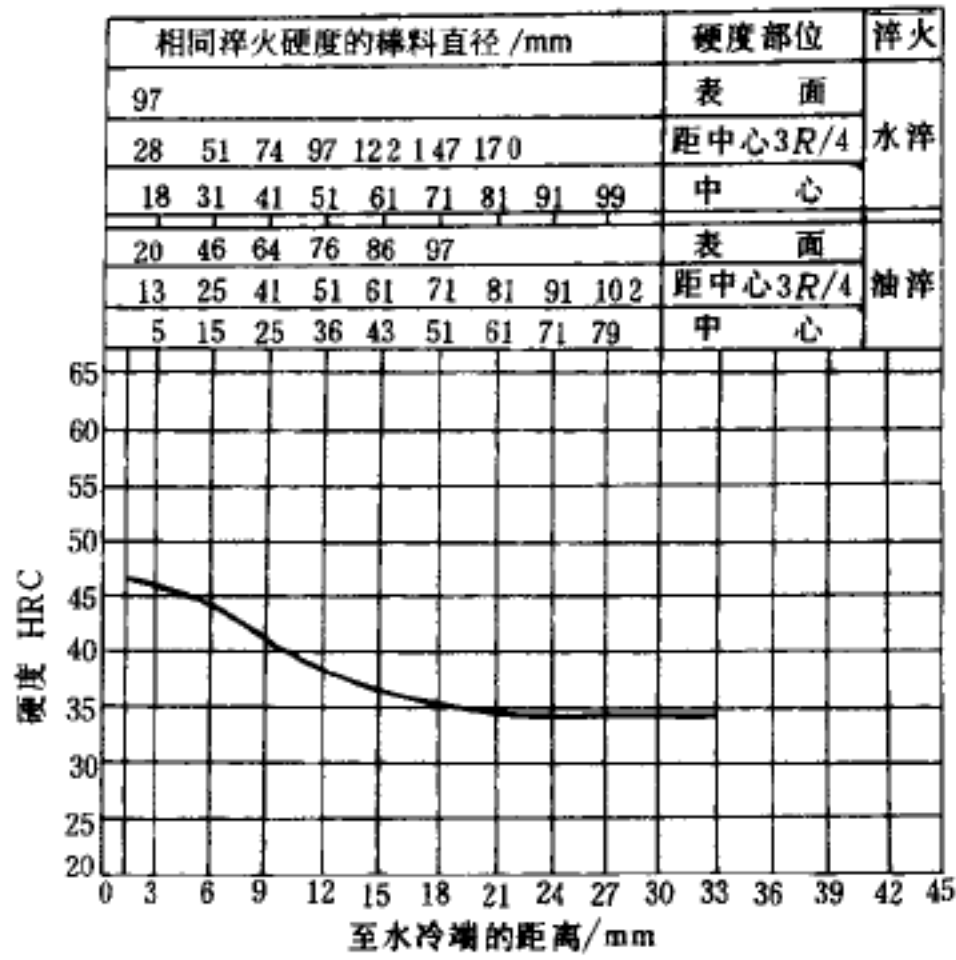
表图 5.3-58 18CrMnMo 钢



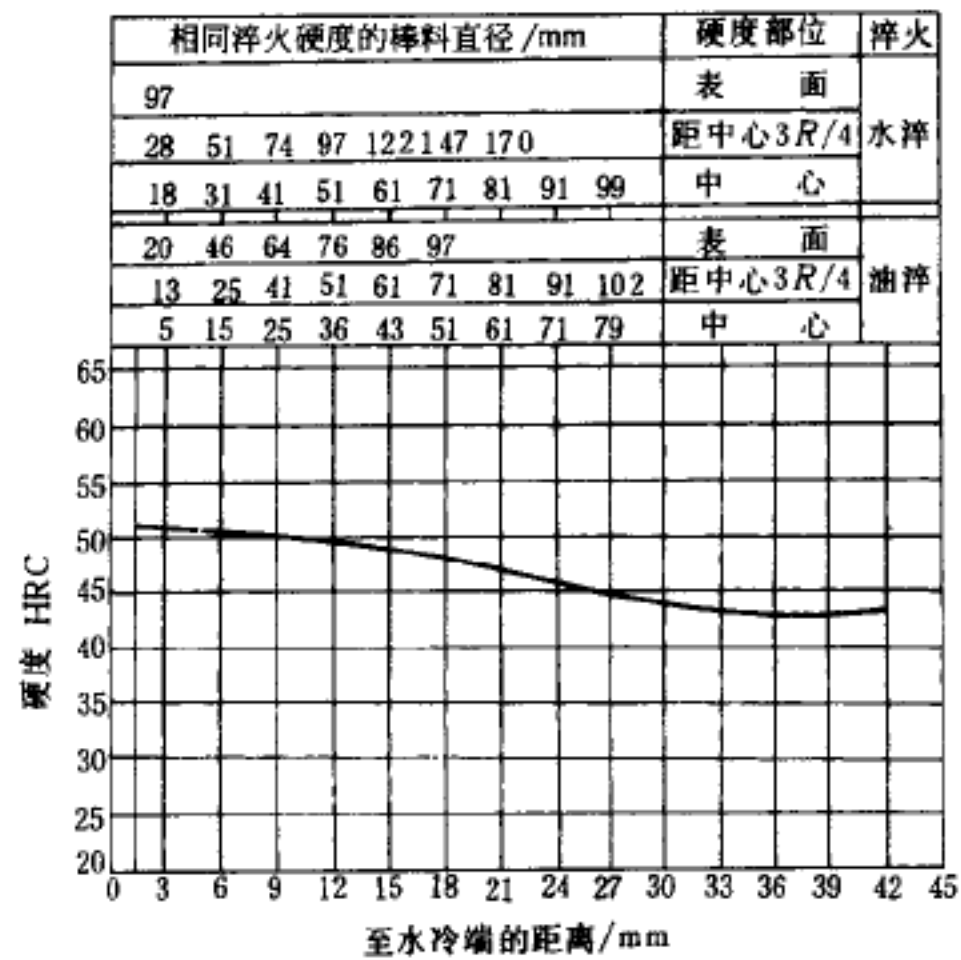
表图 5.3-59 22CrMnMo 钢



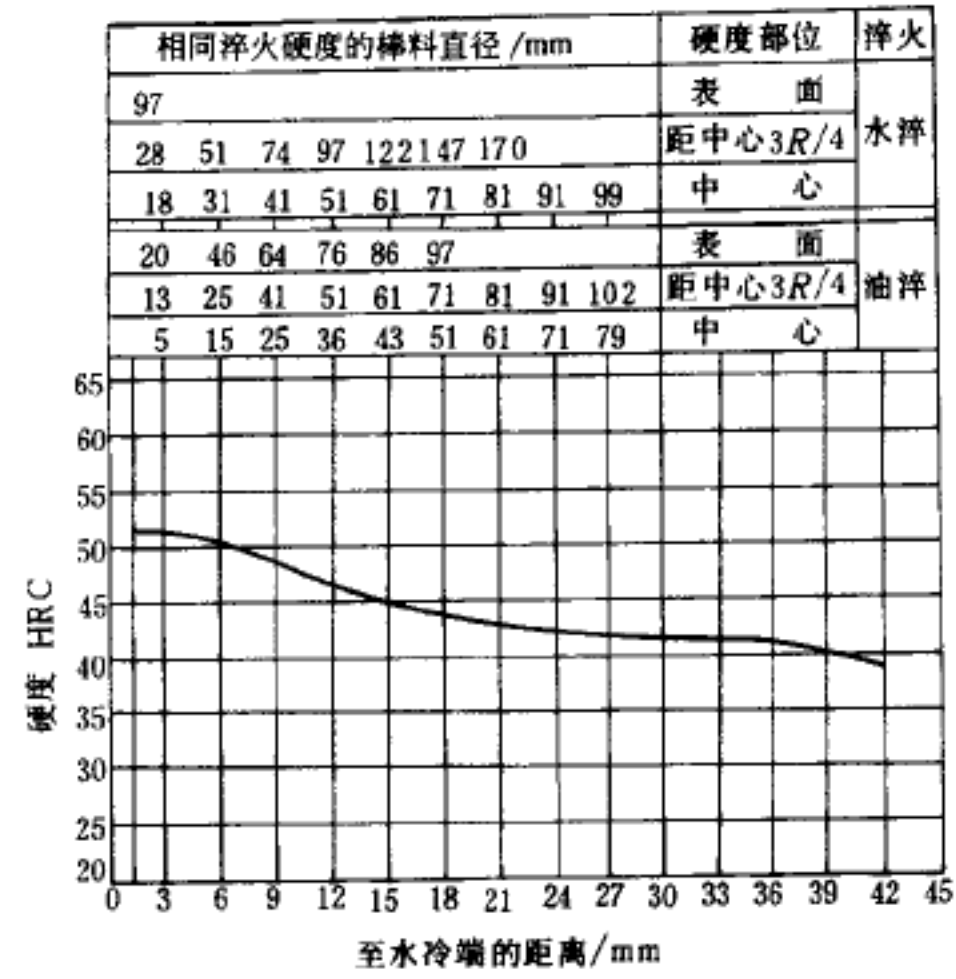
表图 5.3-60 30Cr2MnMo 钢



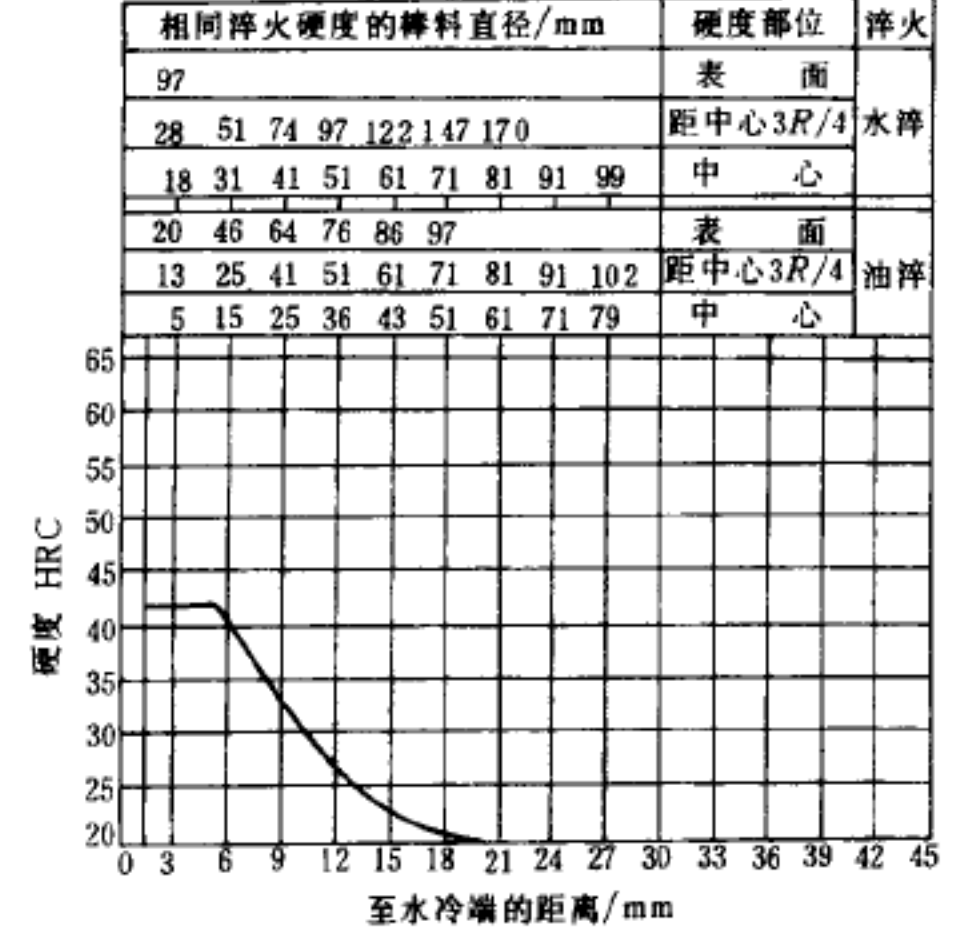
表图 5.3-61 25Cr2MoV 钢



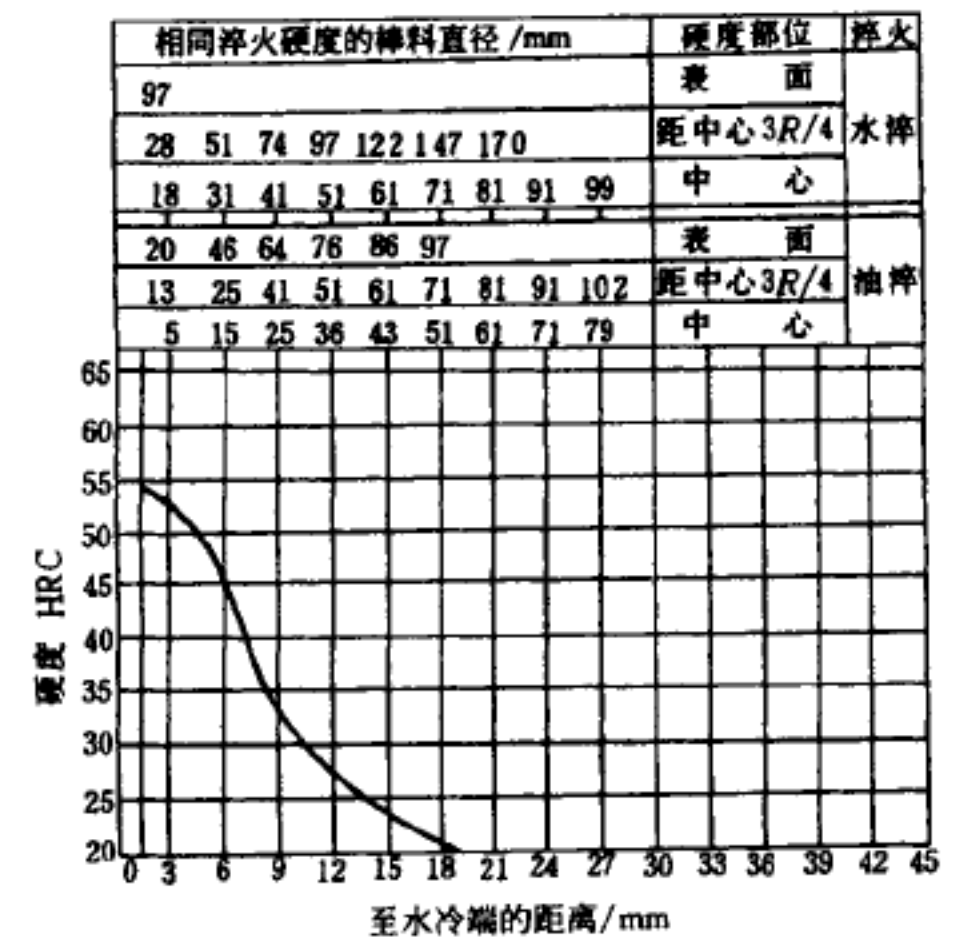
表图 5.3-62 40Cr2MoV 钢



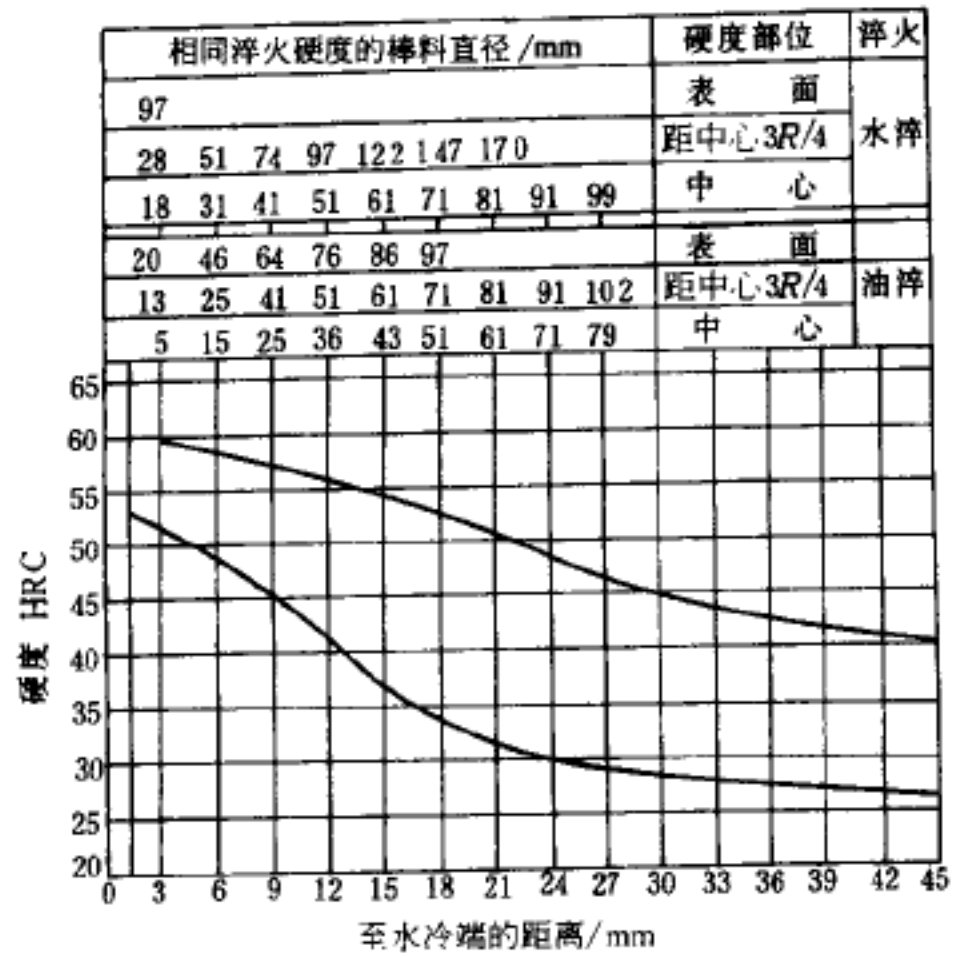
表图 5.3-63 35CrMoAl 钢



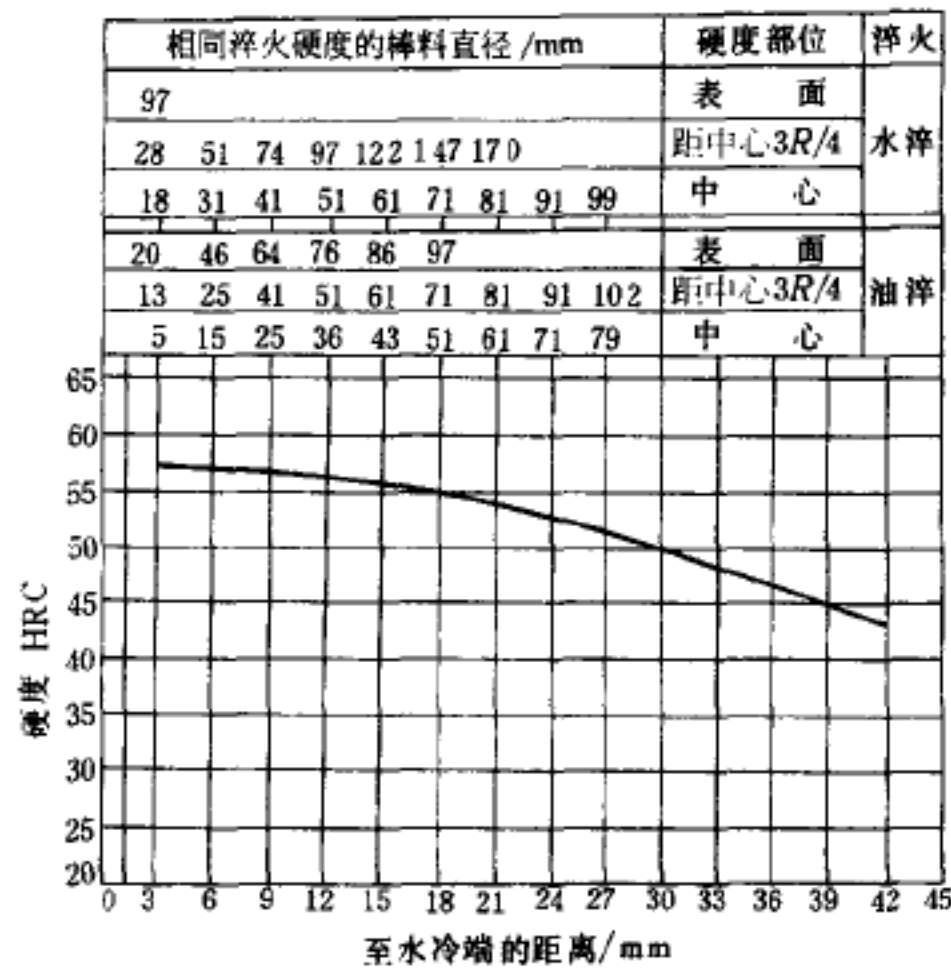
表图 5.3-64 15CrNi 钢



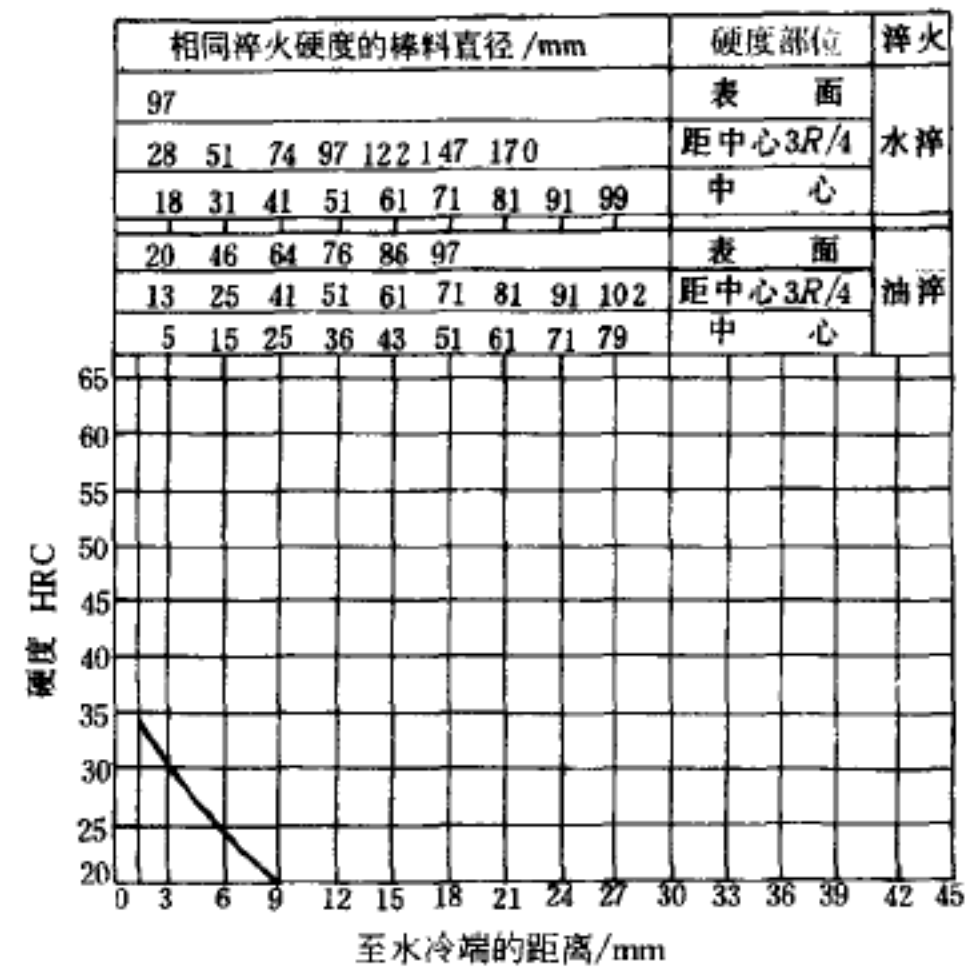
表图 5.3-65 20CrNi 钢



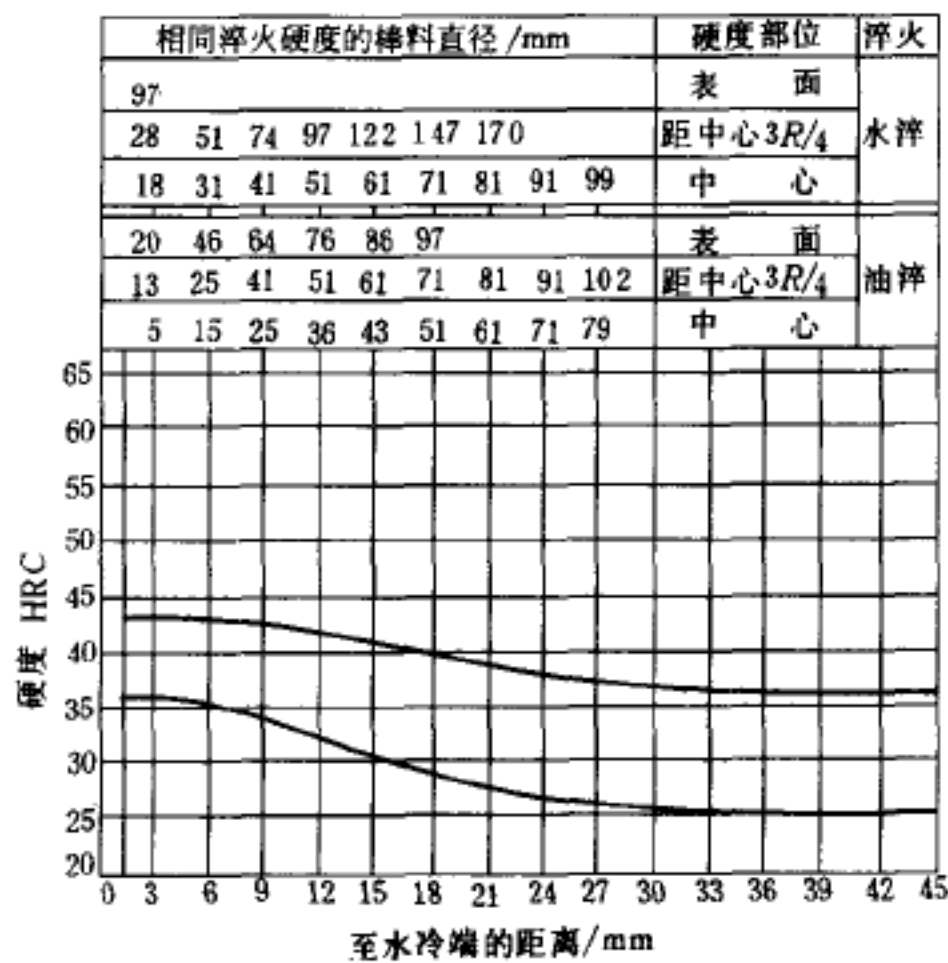
表图 5.3-66 40CrNi 钢



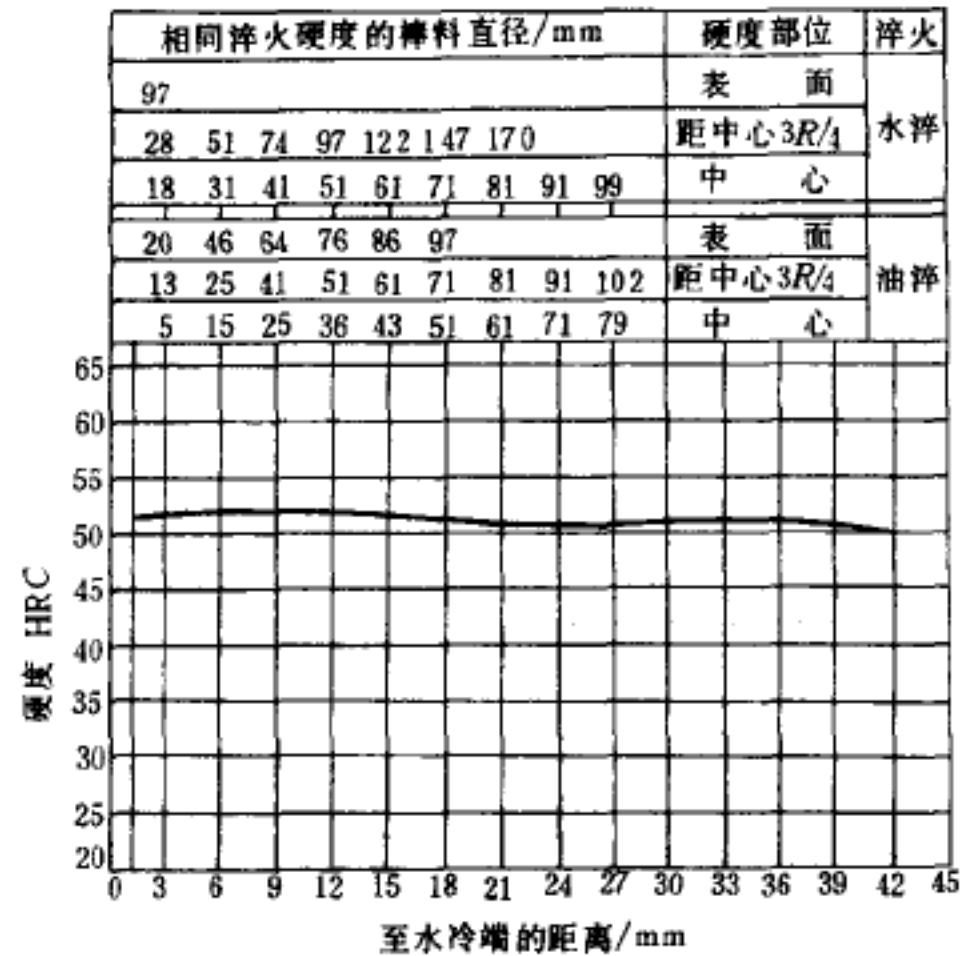
表图 5.3-67 50CrNi 钢



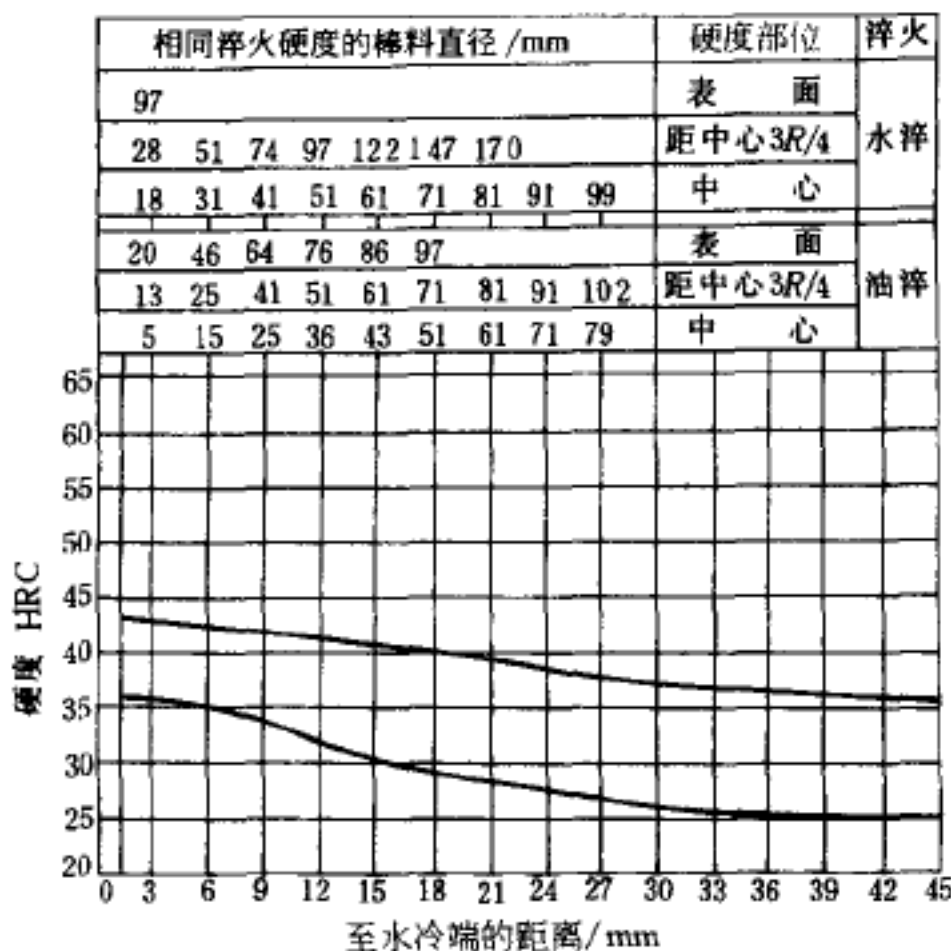
表图 5.3-68 12CrNi2 钢



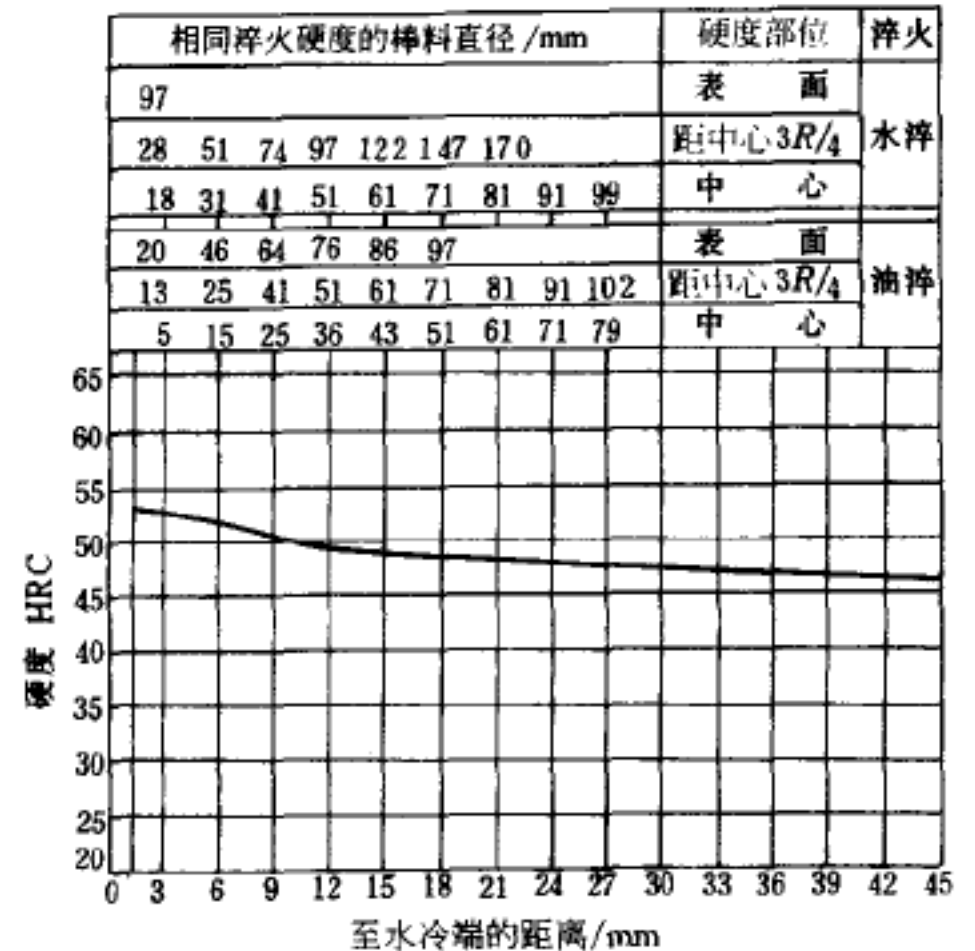
表图 5.3-69 12CrNi3 钢



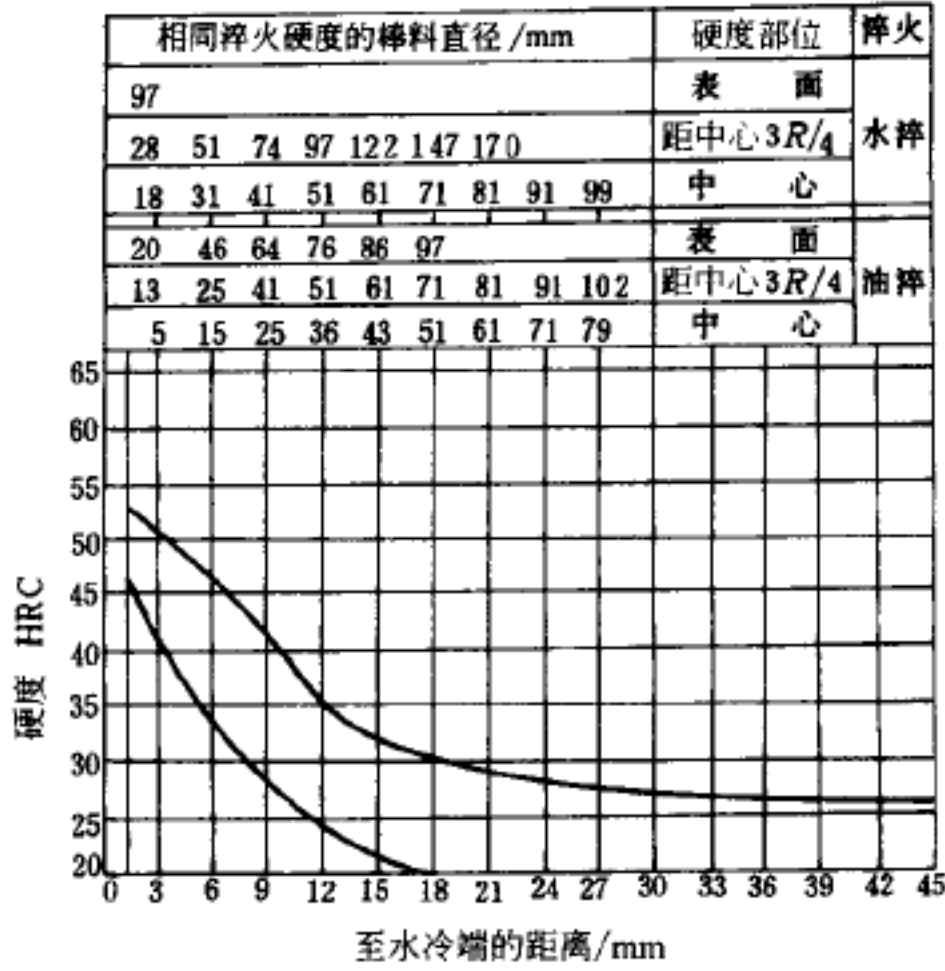
表图 5.3-70 30CrNi3 钢



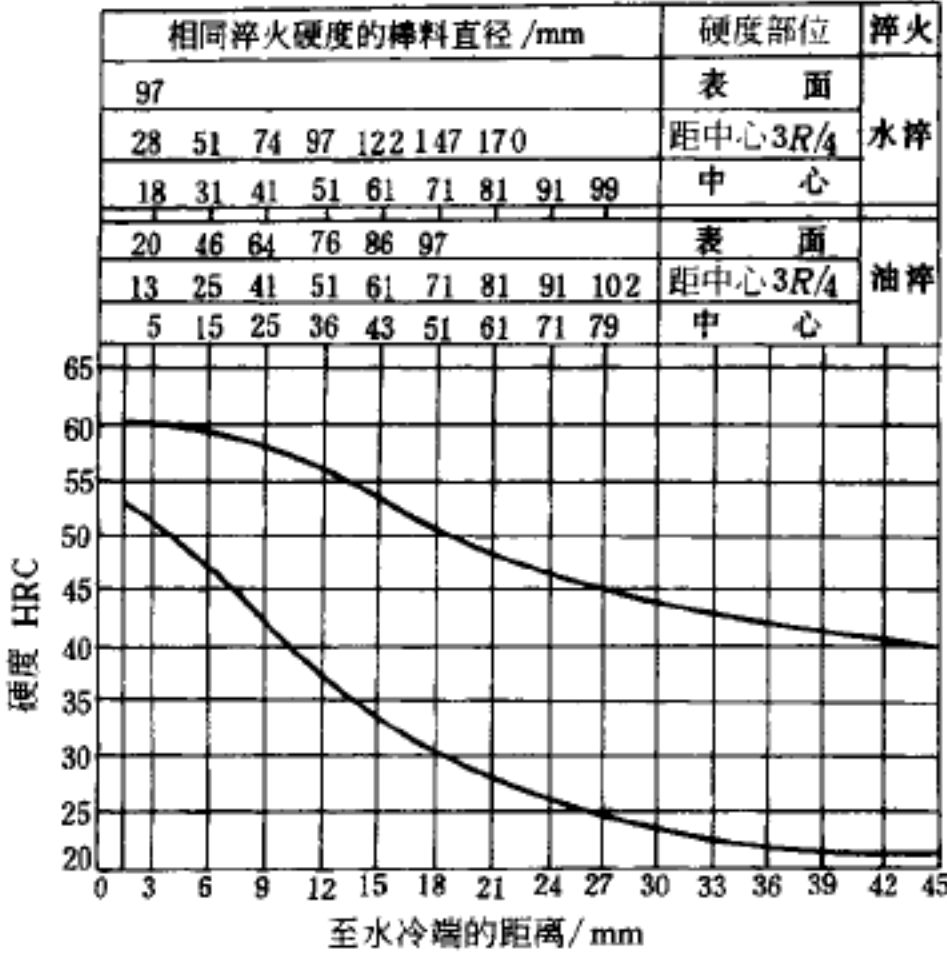
表图 5.3-71 12Cr2Ni4 钢



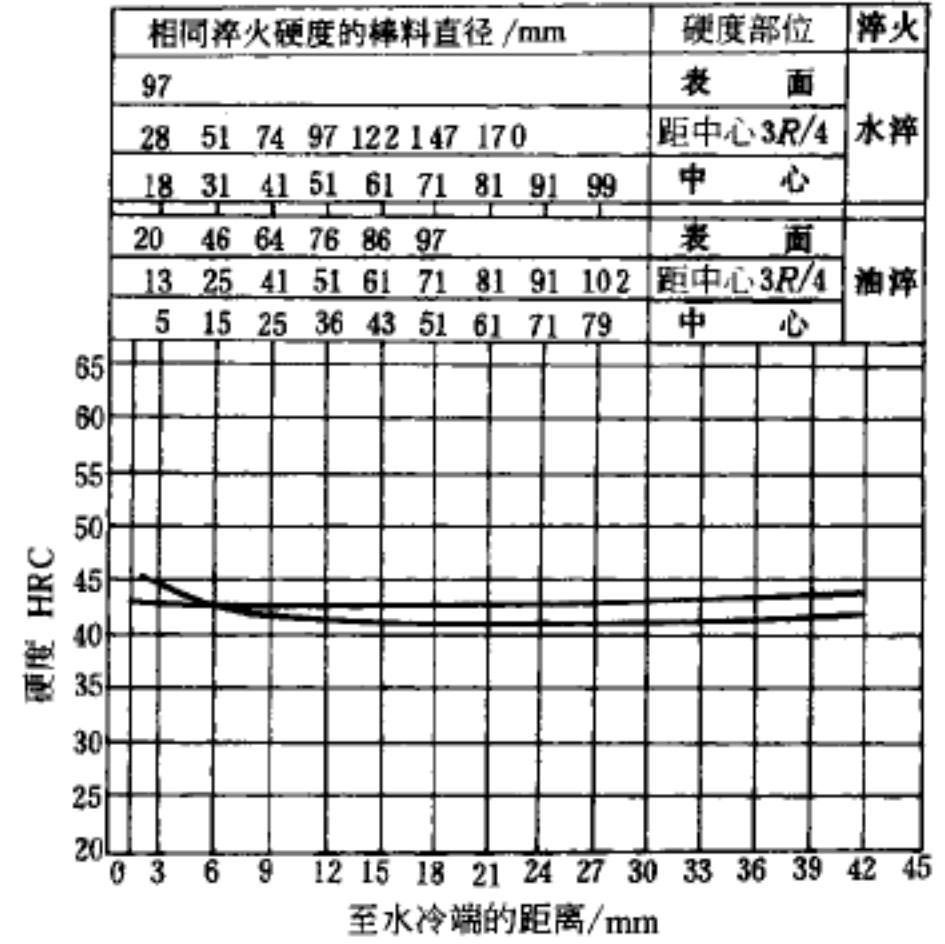
表图 5.3-72 20Cr2Ni4 钢



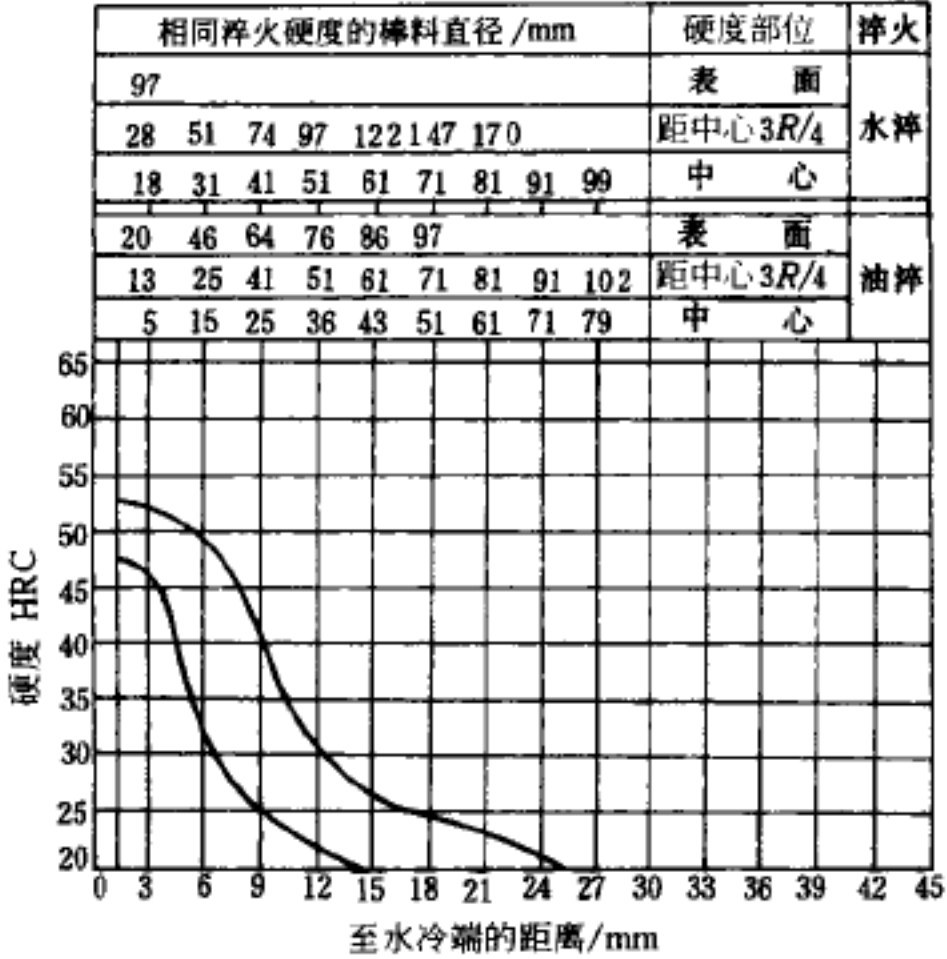
表图 5.3-73 30CrNiMo 钢



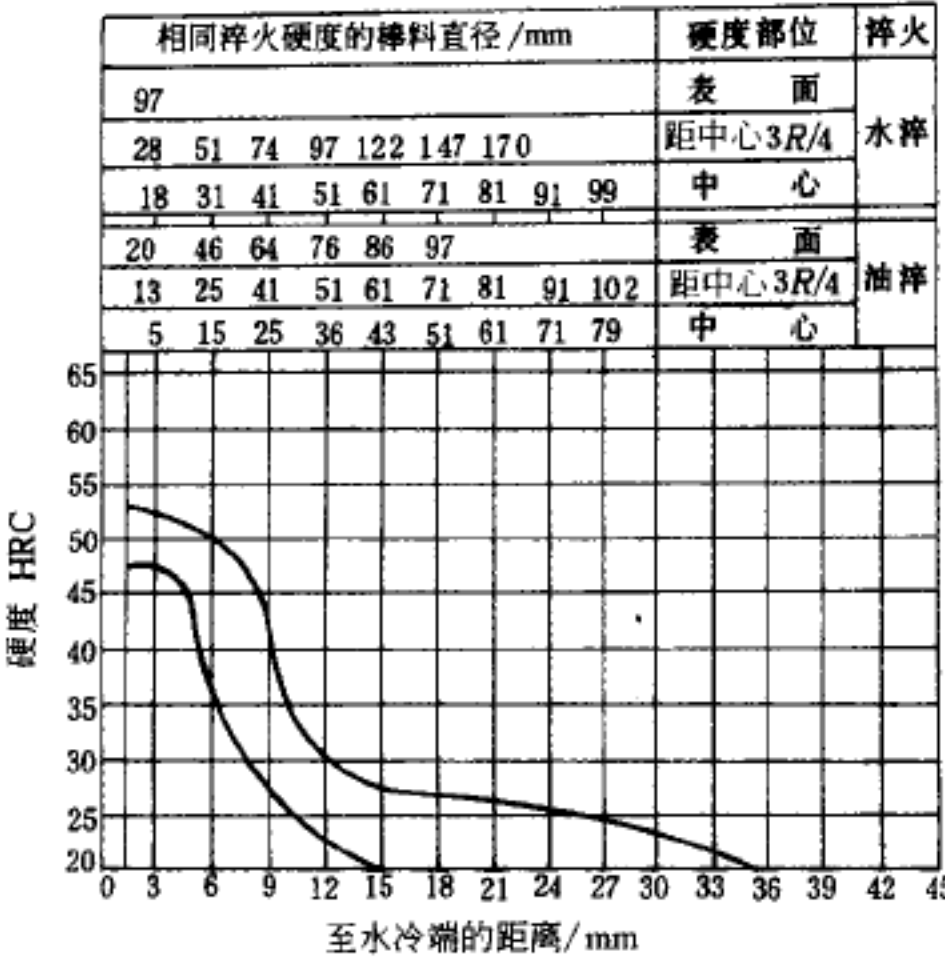
表图 5.3-74 40CrNiMo 钢



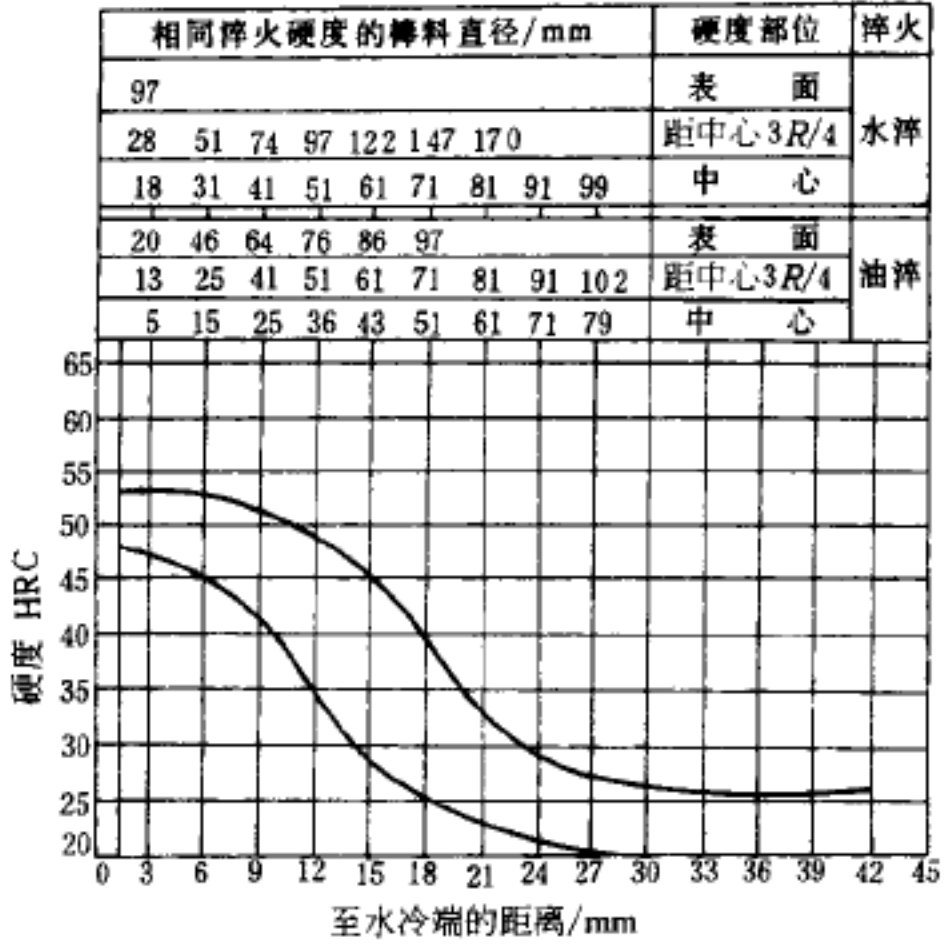
表图 5.3-75 18Cr2Ni4W 钢



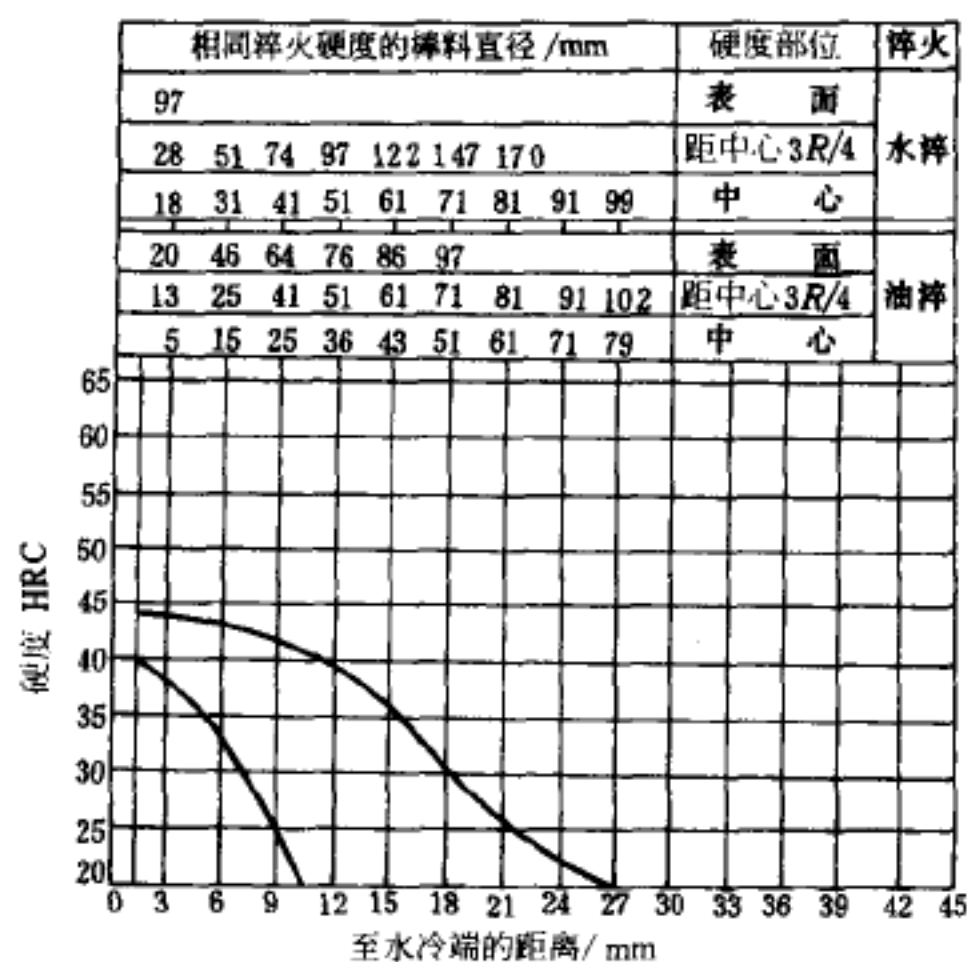
表图 5.3-76 40B 钢



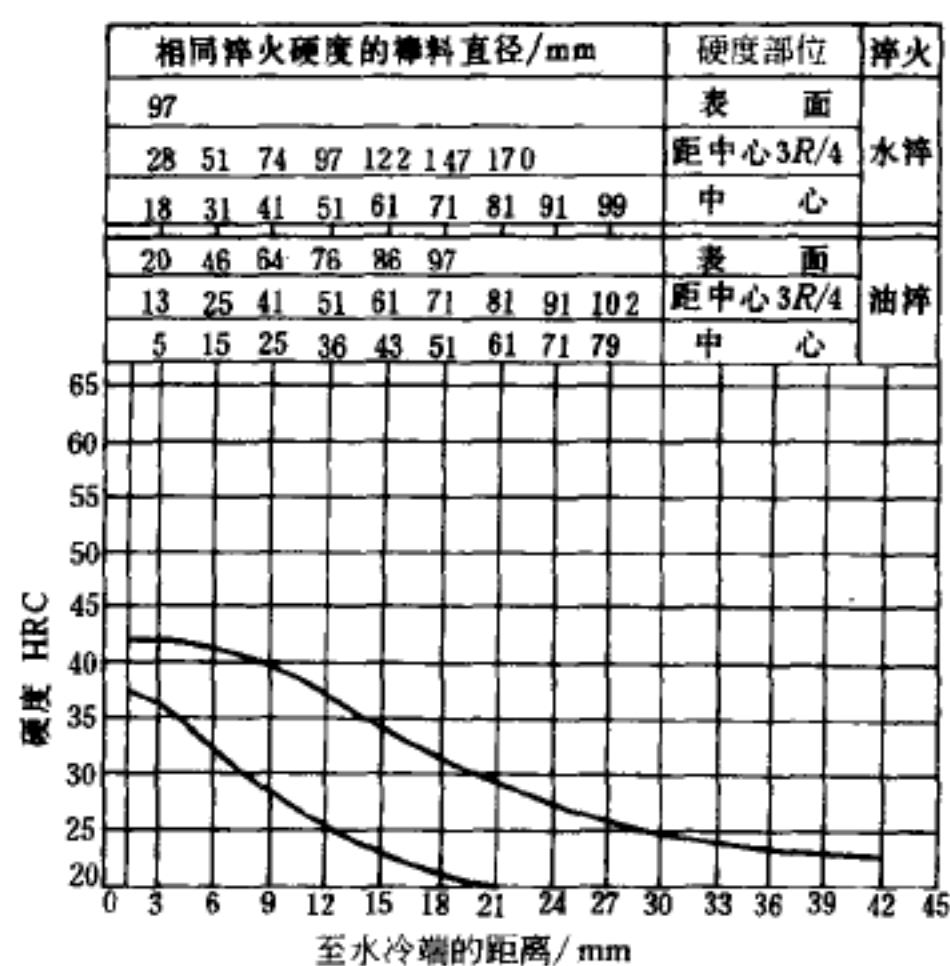
表图 5.3-77 45B 钢



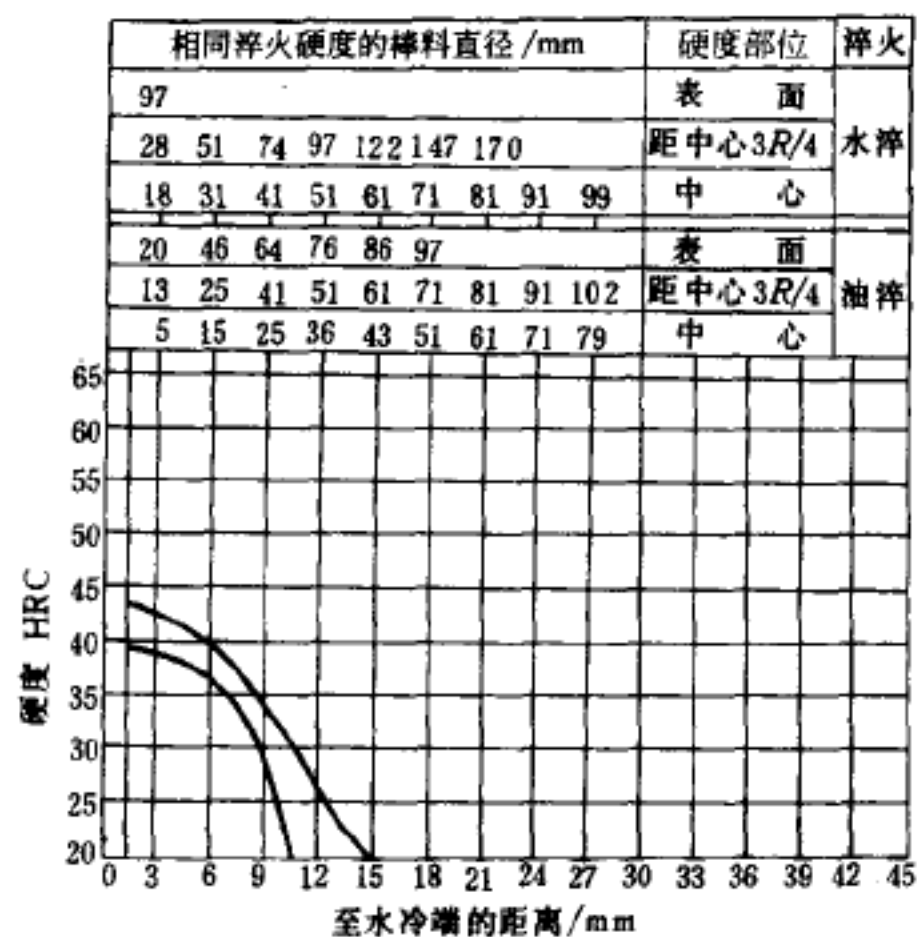
表图 5.3-78 40MnB 钢



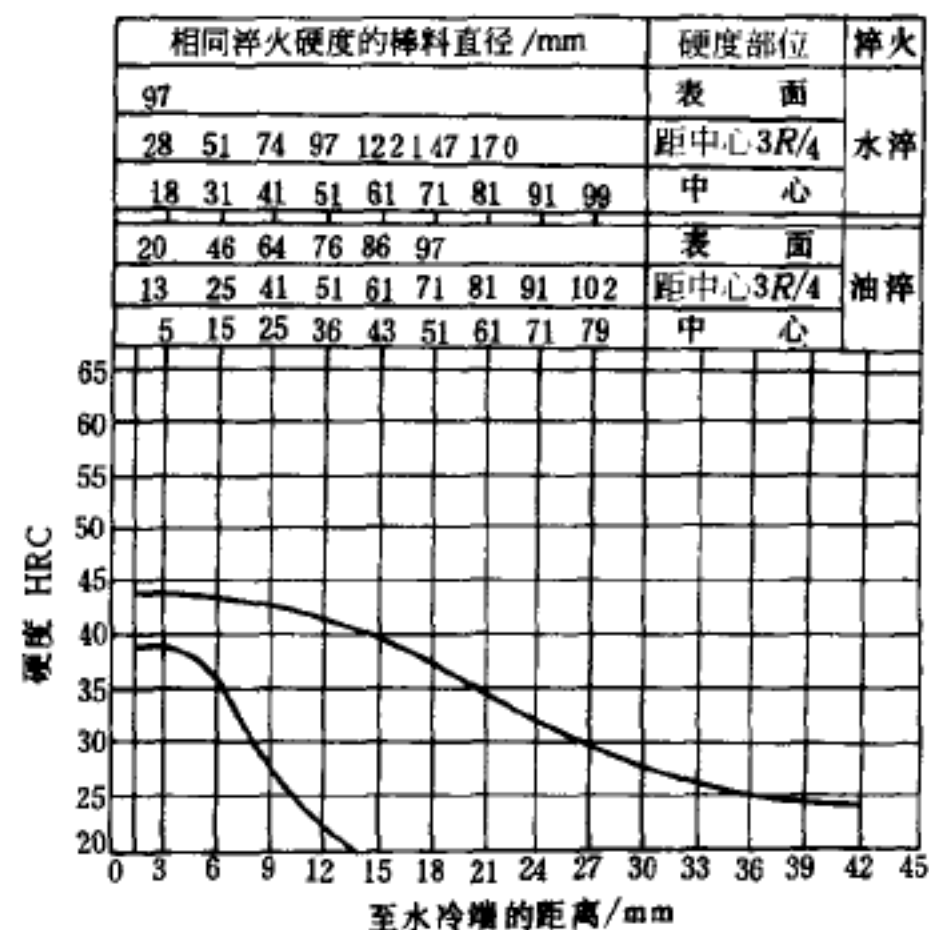
表图 5.3-79 20Mn2B 钢



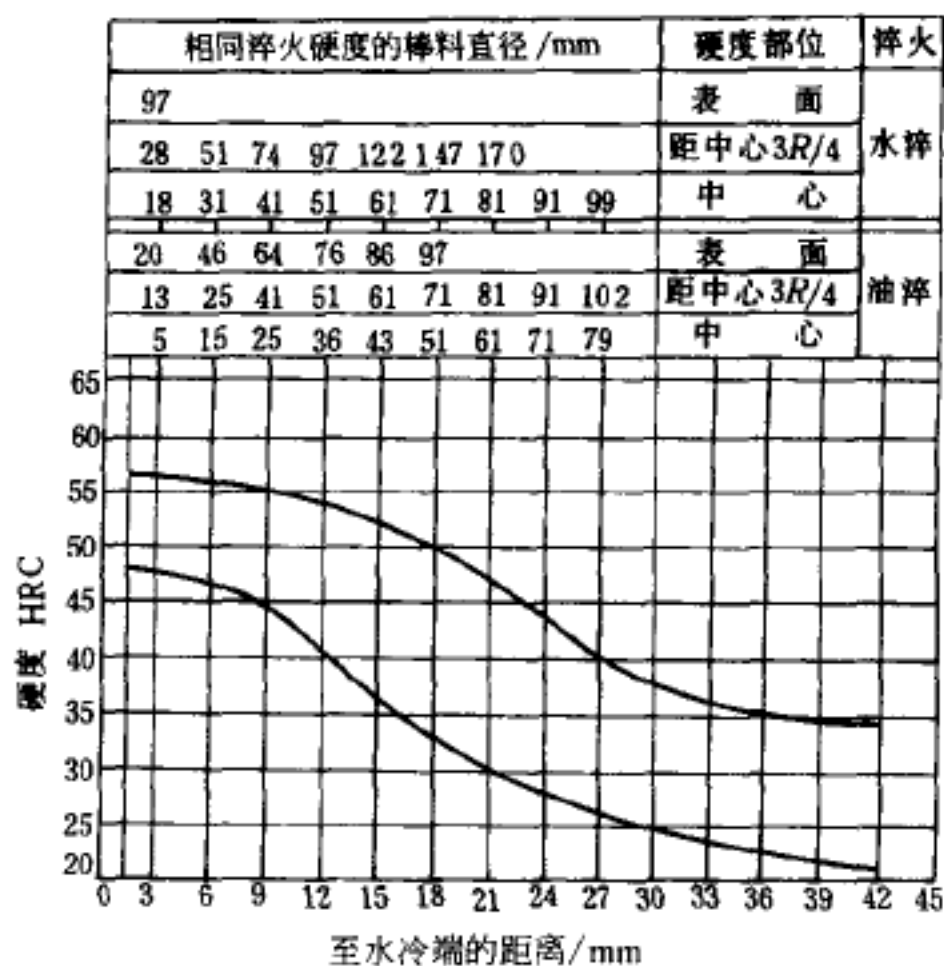
表图 5.3-80 20MnMoB 钢



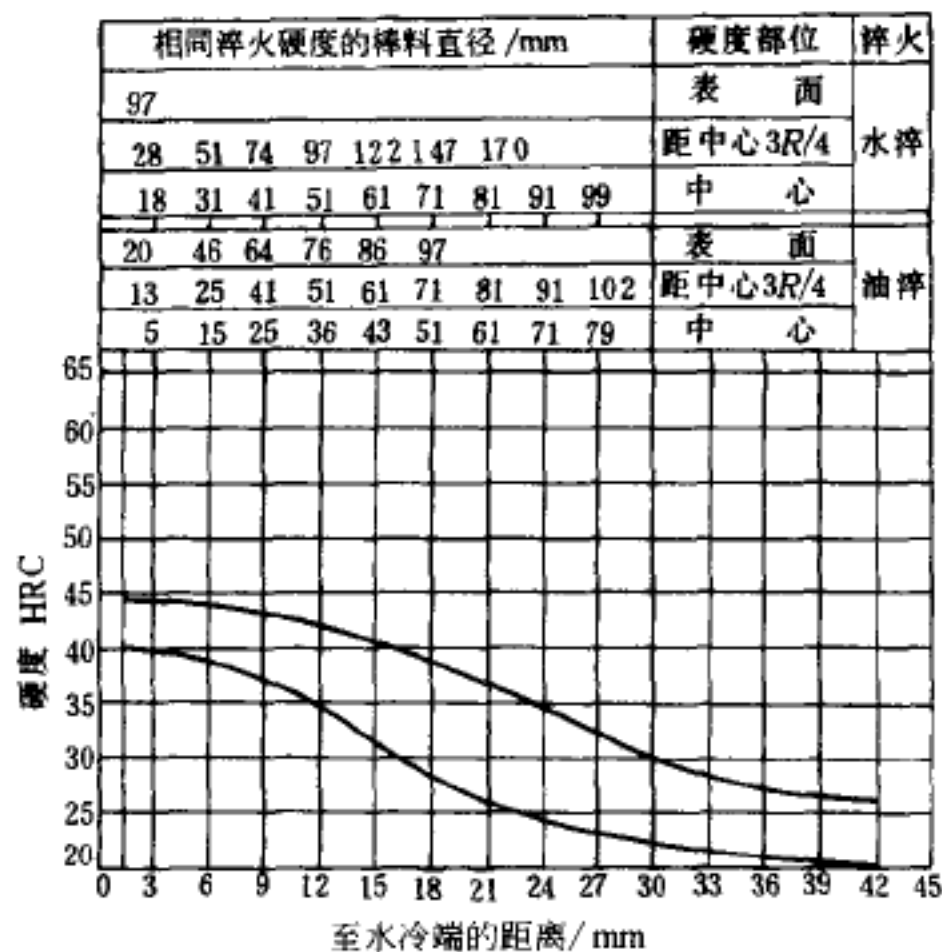
表图 5.3-81 20MnTiB 钢



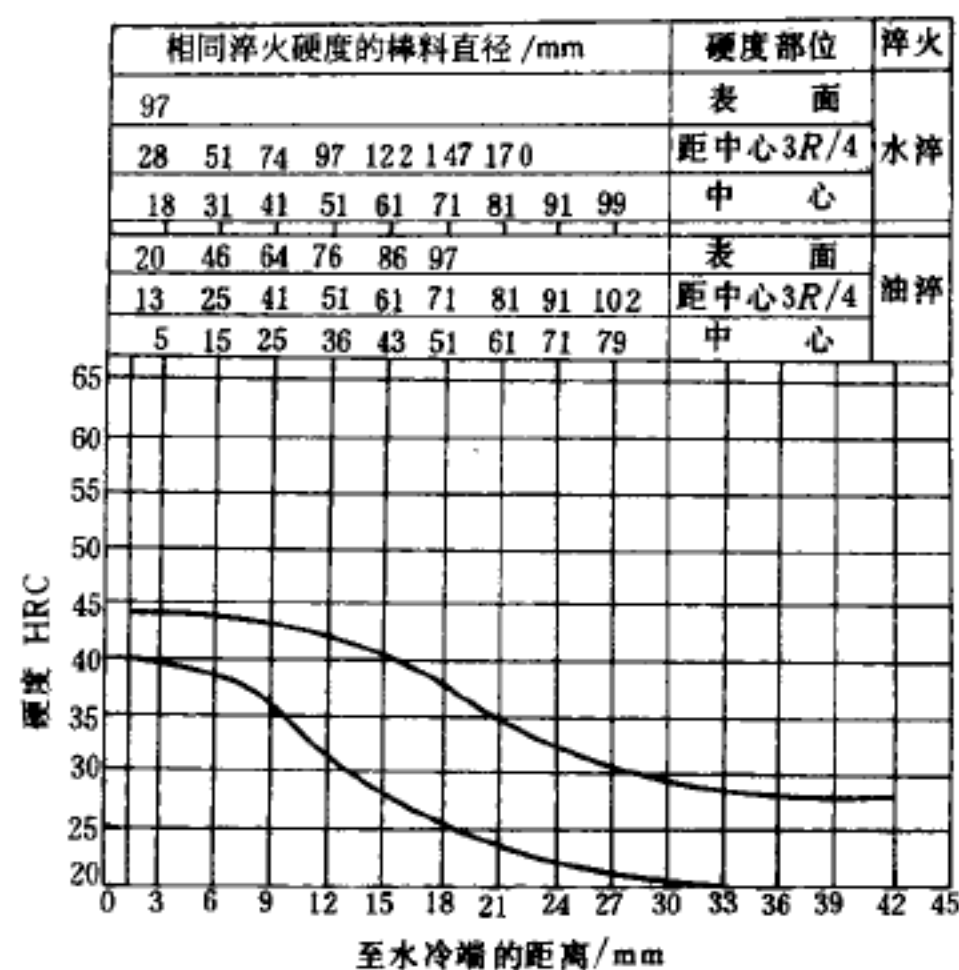
表图 5.3-82 20MnVB 钢



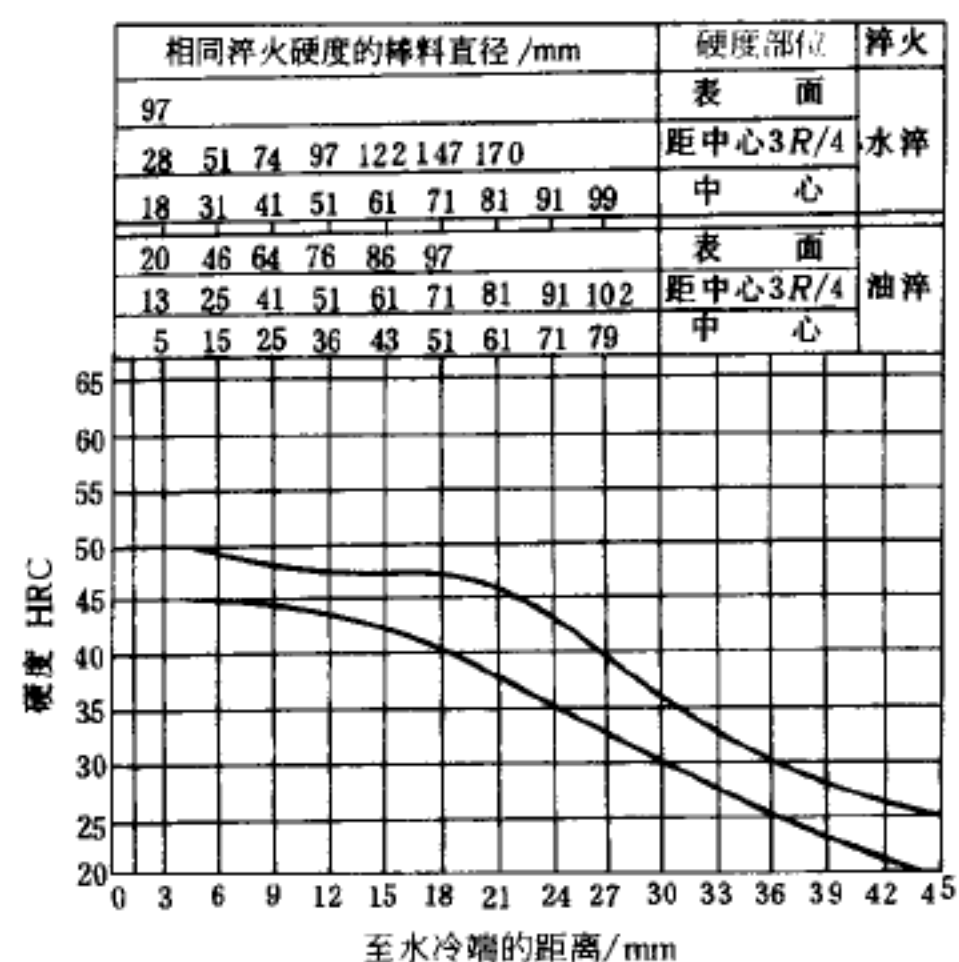
表图 5.3-83 40MnVB 钢



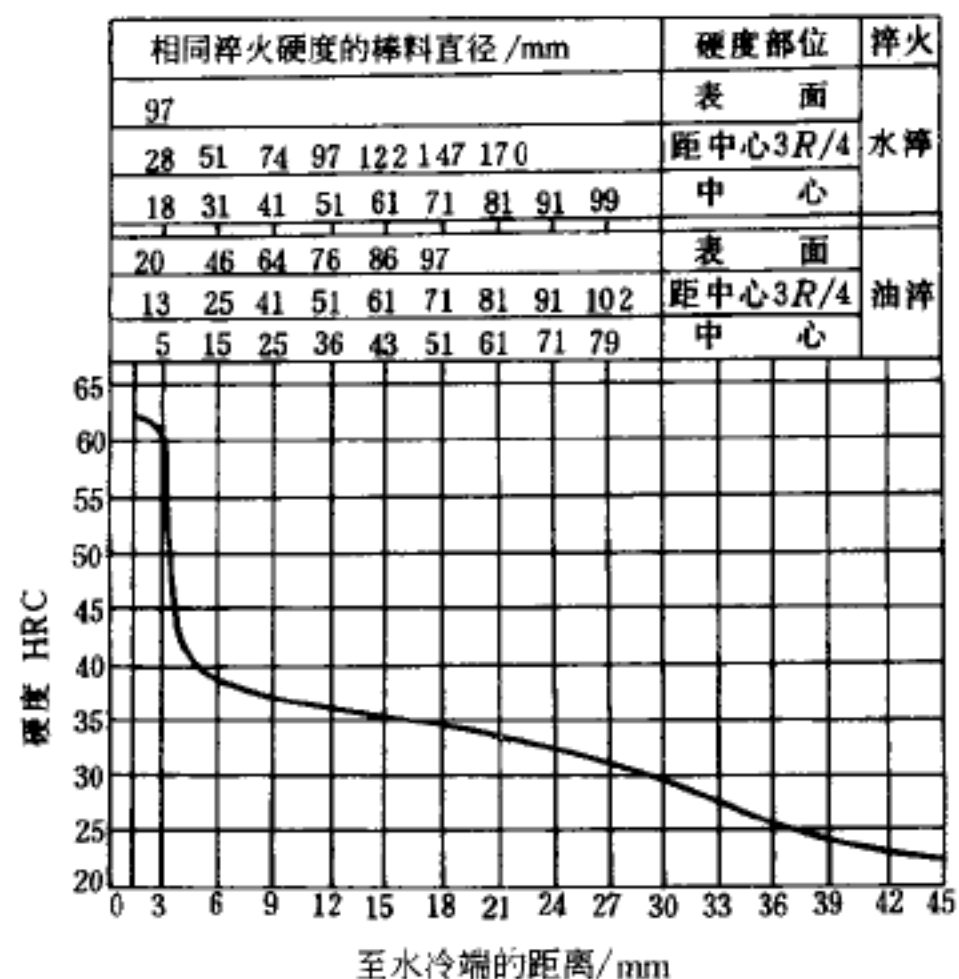
表图 5.3-84 20SiMnVB 钢



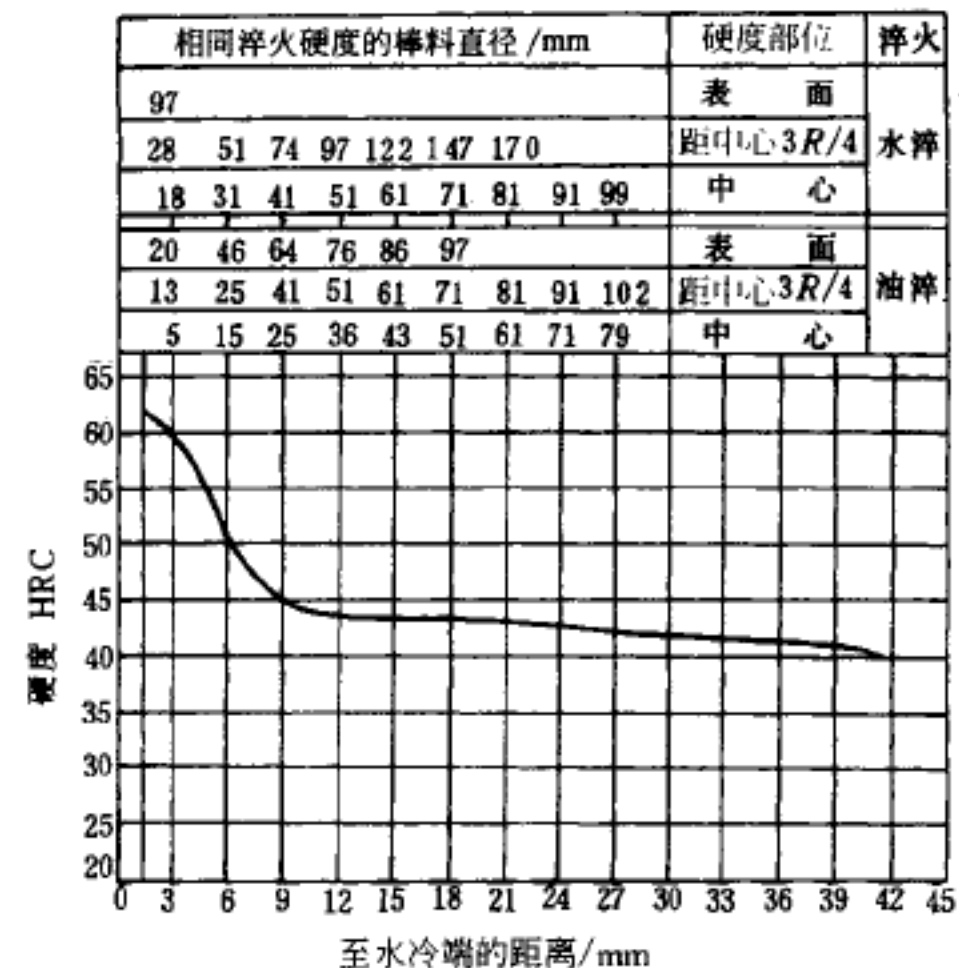
表图 5.3-85 20CrMnMoVB 钢



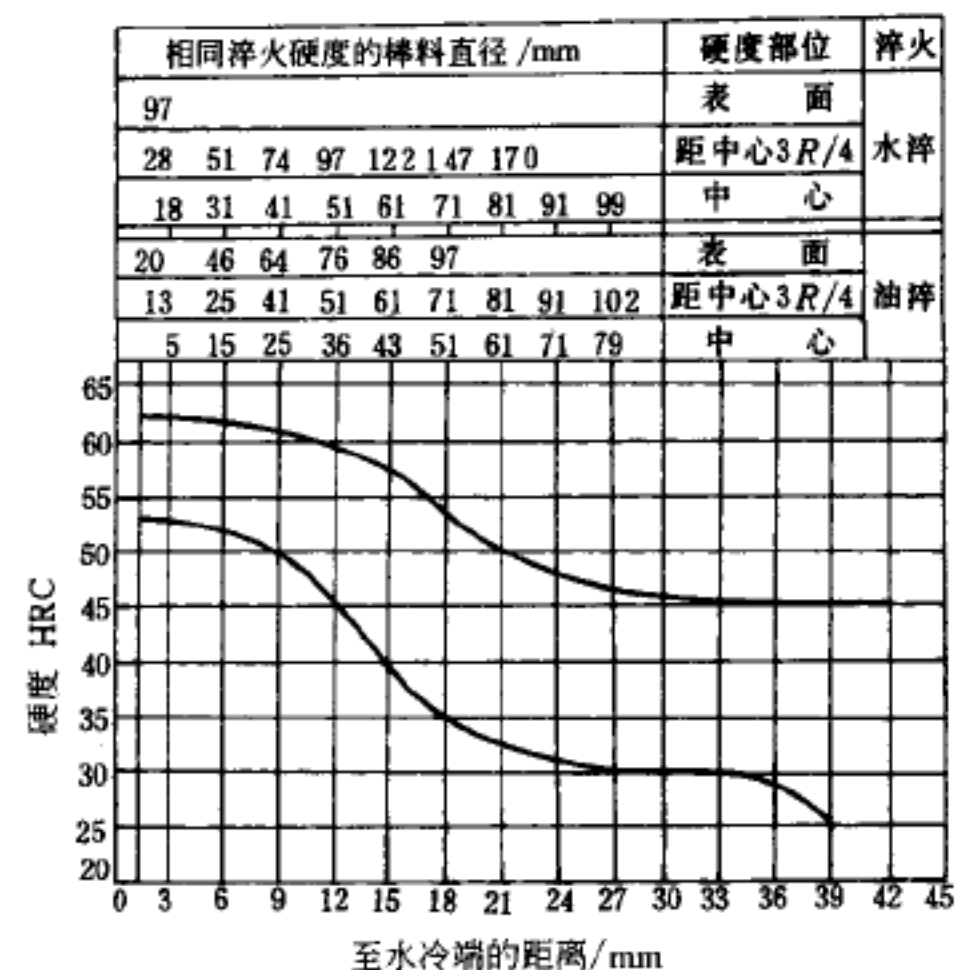
表图 5.3-86 25MnTiBRE 钢



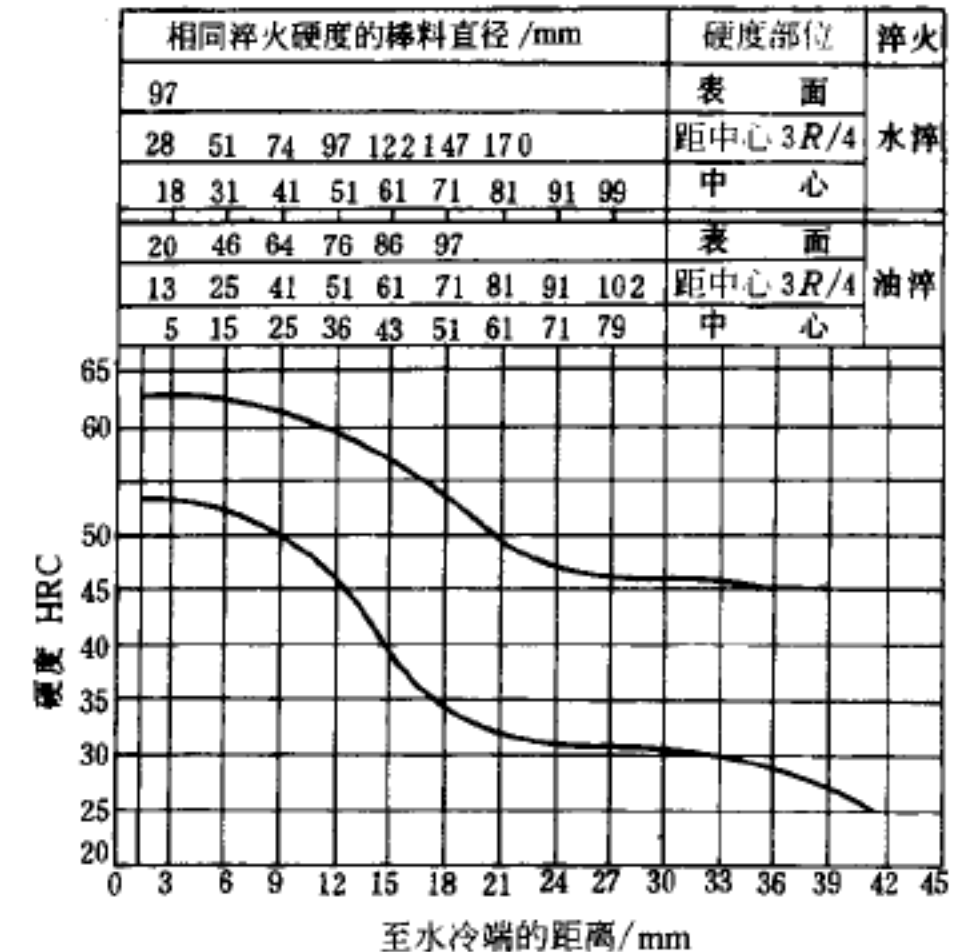
表图 5.3-87 60 钢



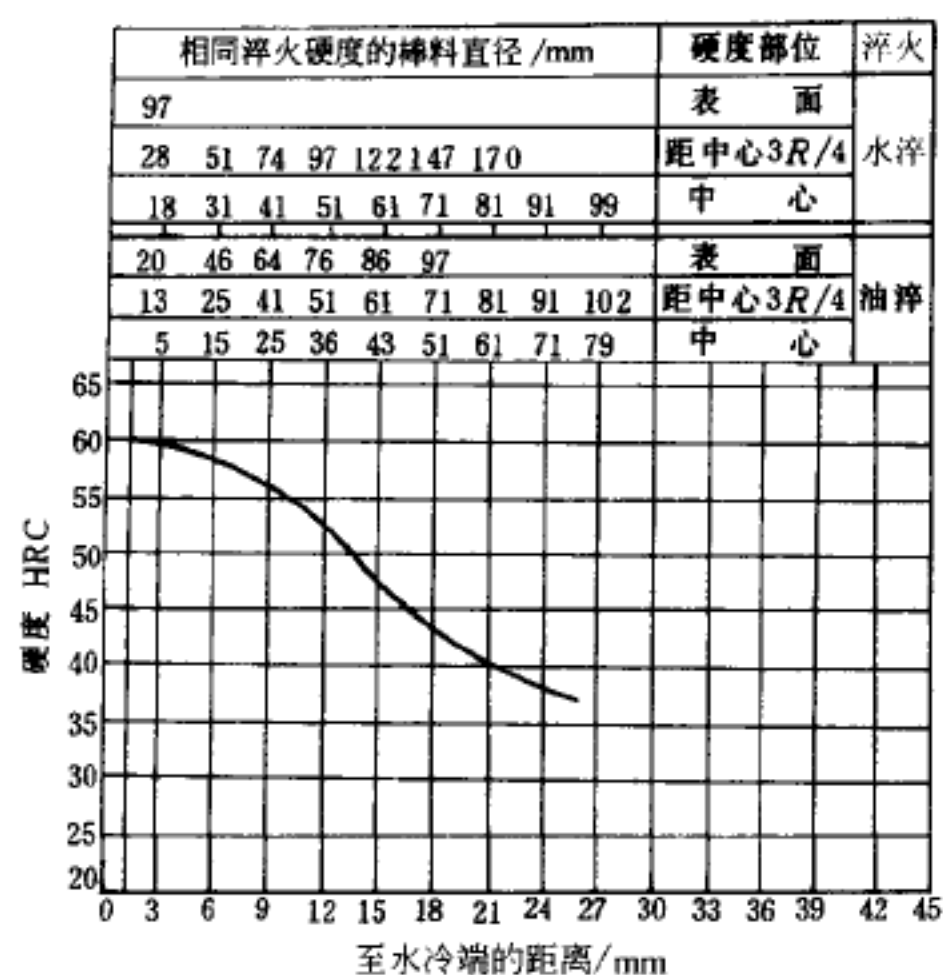
表图 5.3-88 85 钢



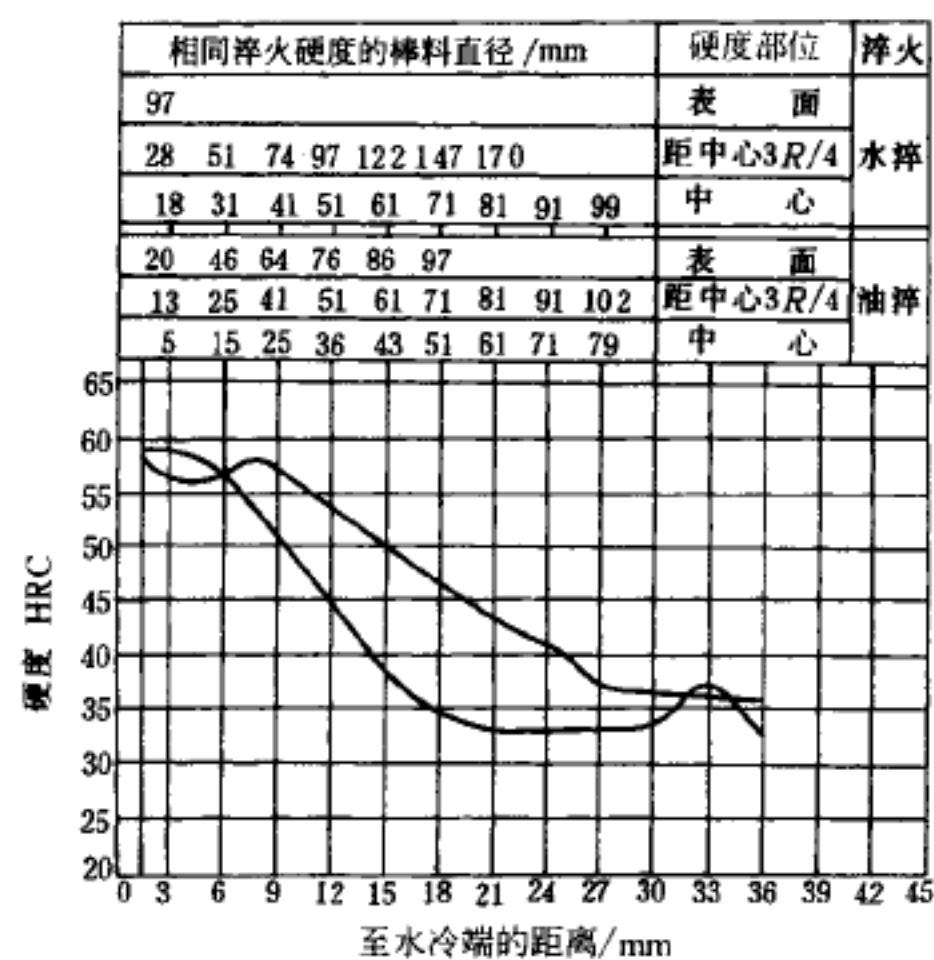
表图 5.3-89 55Si2Mn 钢



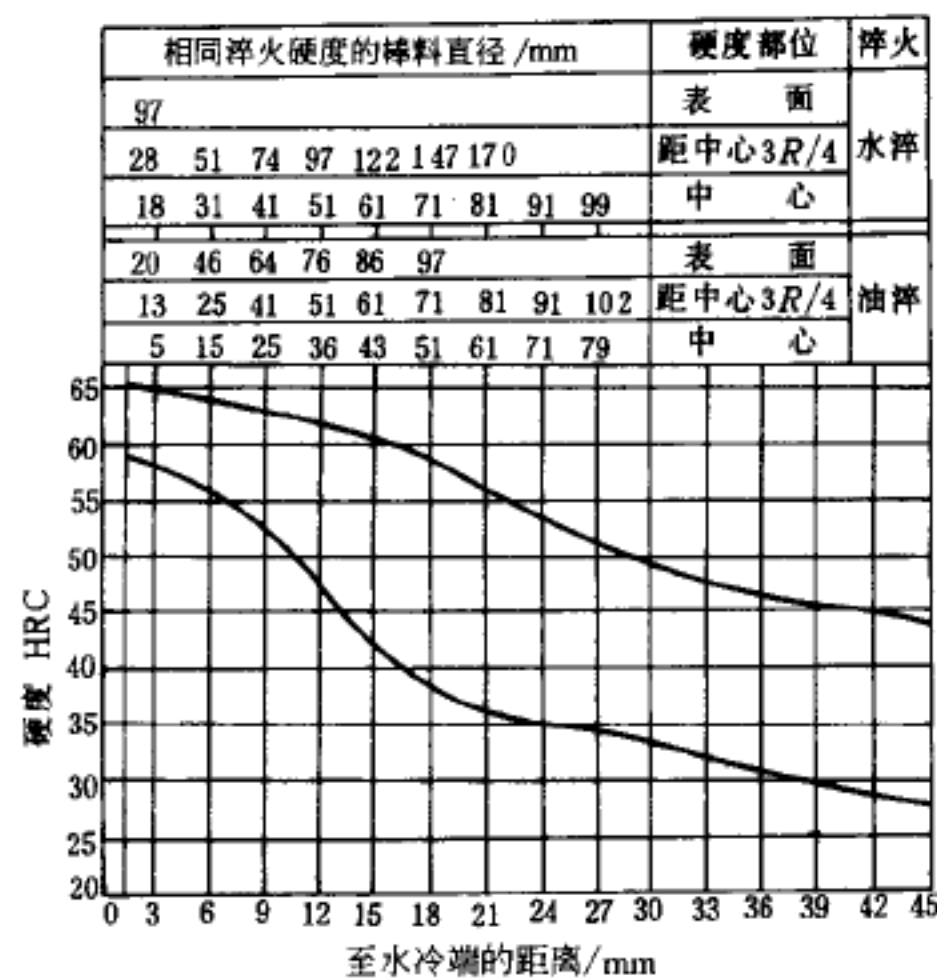
表图 5.3-90 60Si2Mn 钢



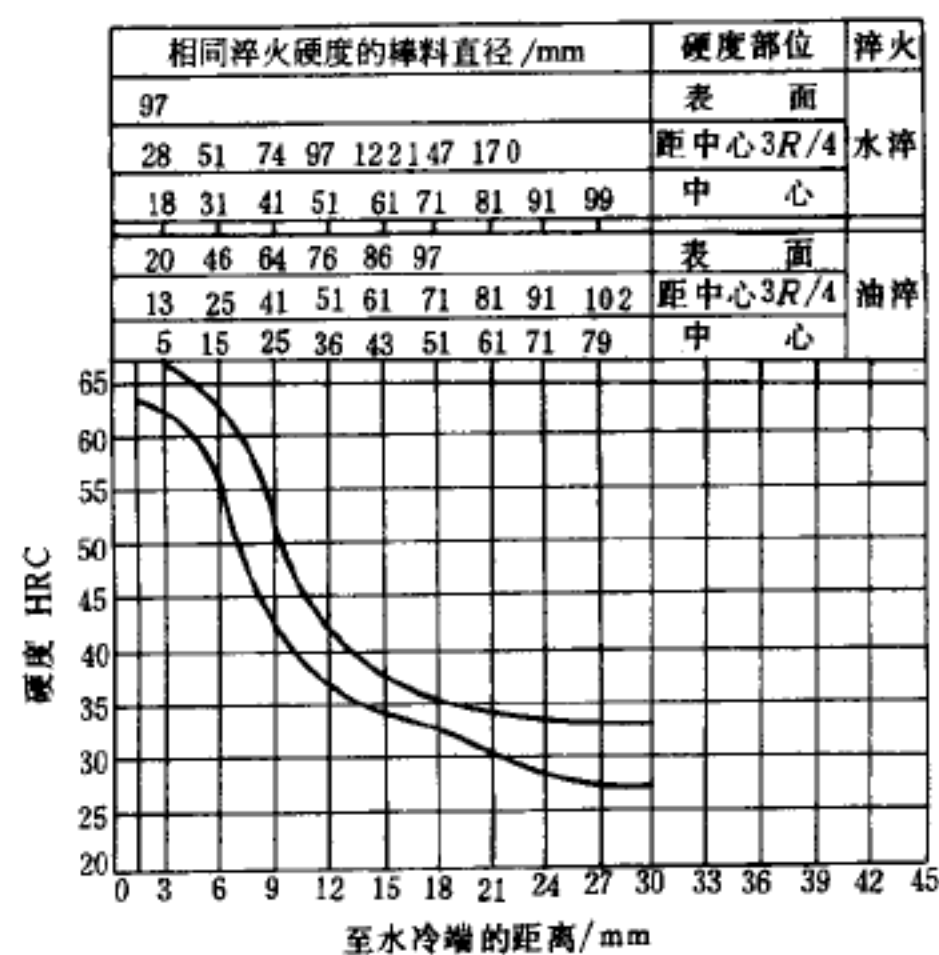
表图 5.3-91 50CrMn 钢



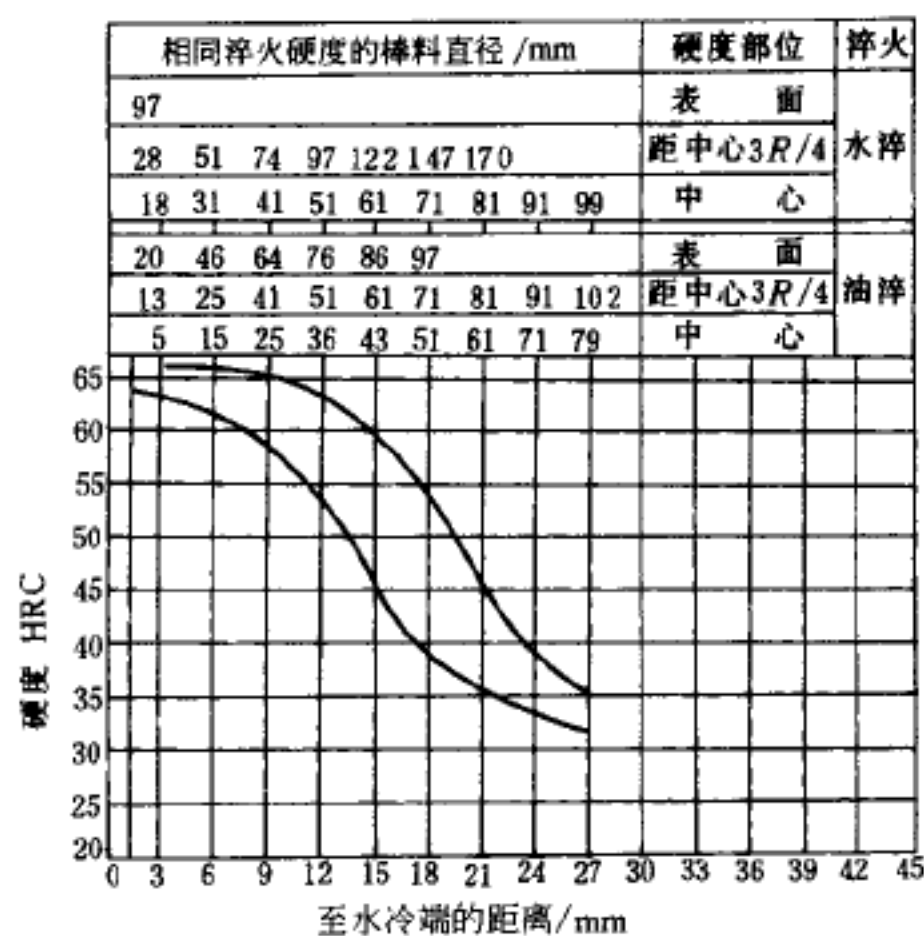
表图 5.3-92 50CrV 钢



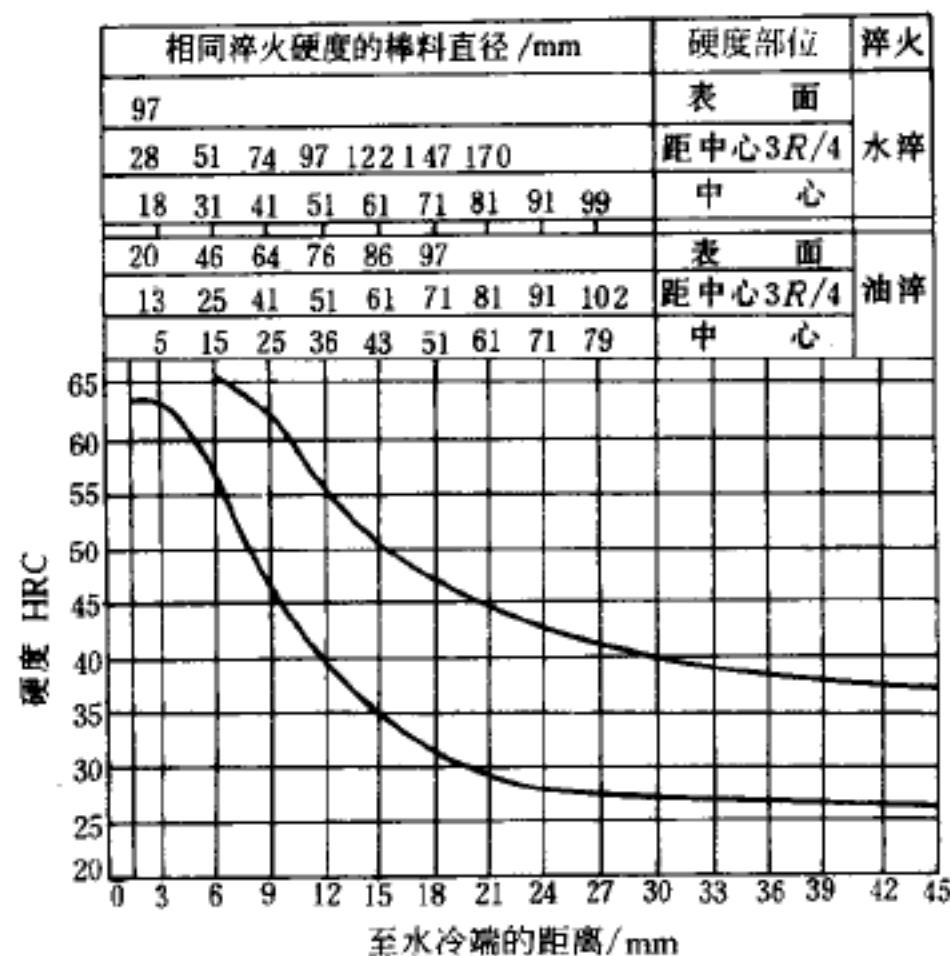
表图 5.3-93 50CrMnVA 钢



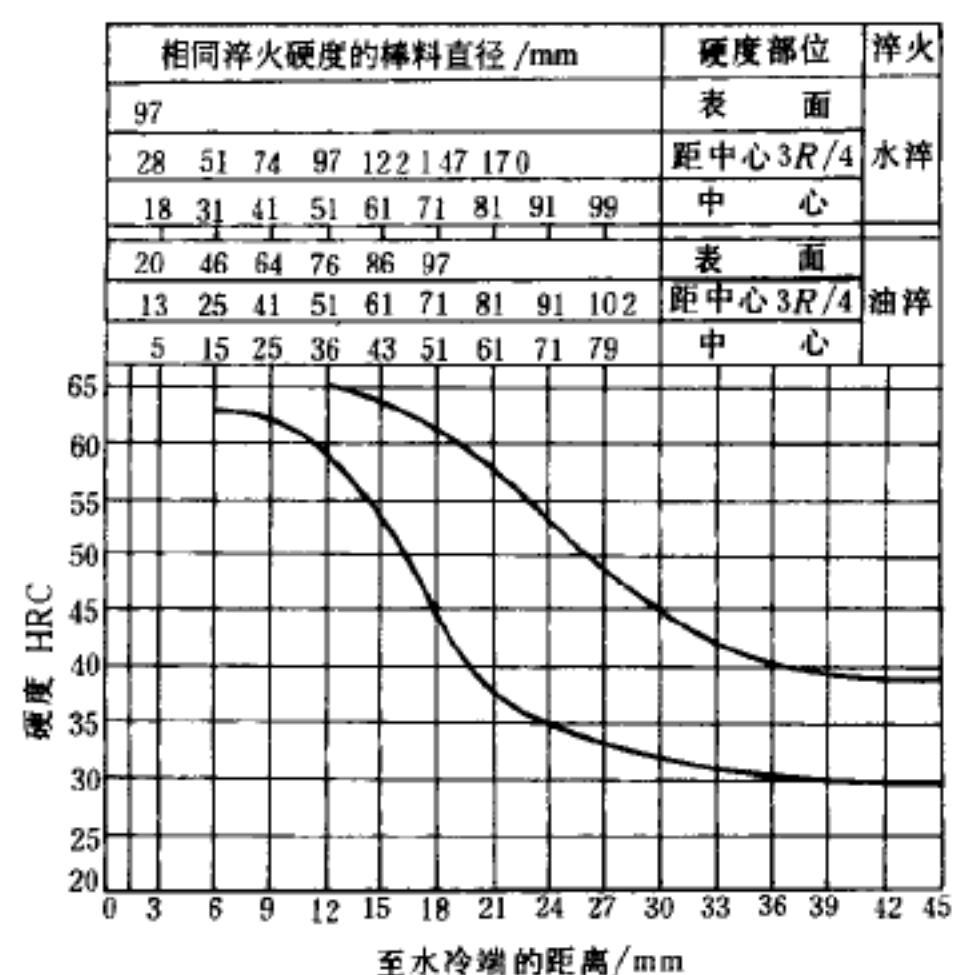
表图 5.3-94 GCr9 钢



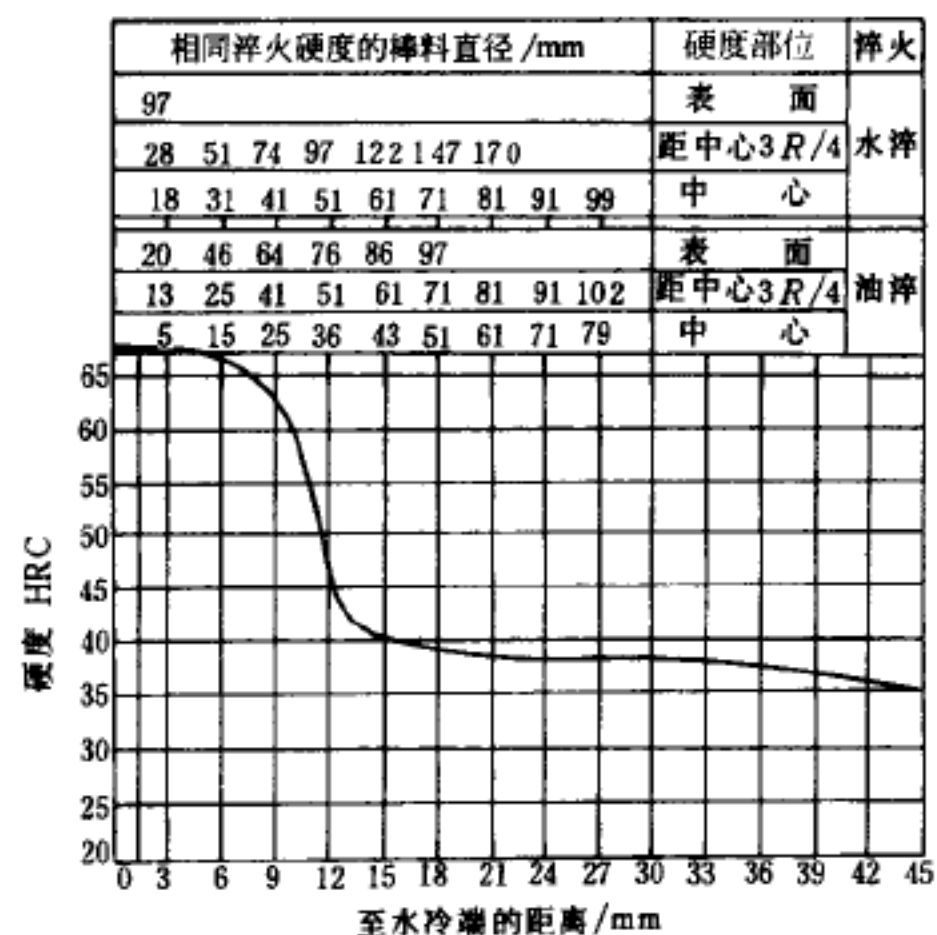
表图 5.3-95 GCr9SiMn 钢



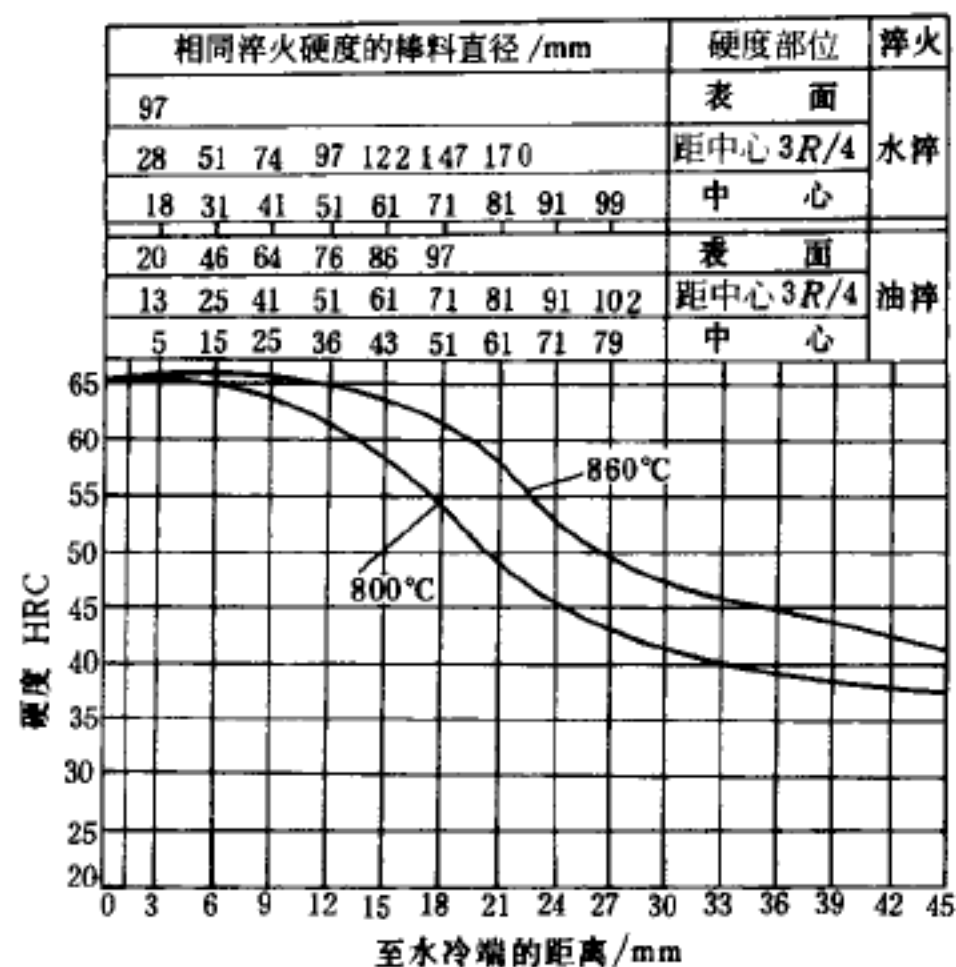
表图 5.3-96 GCr15 钢



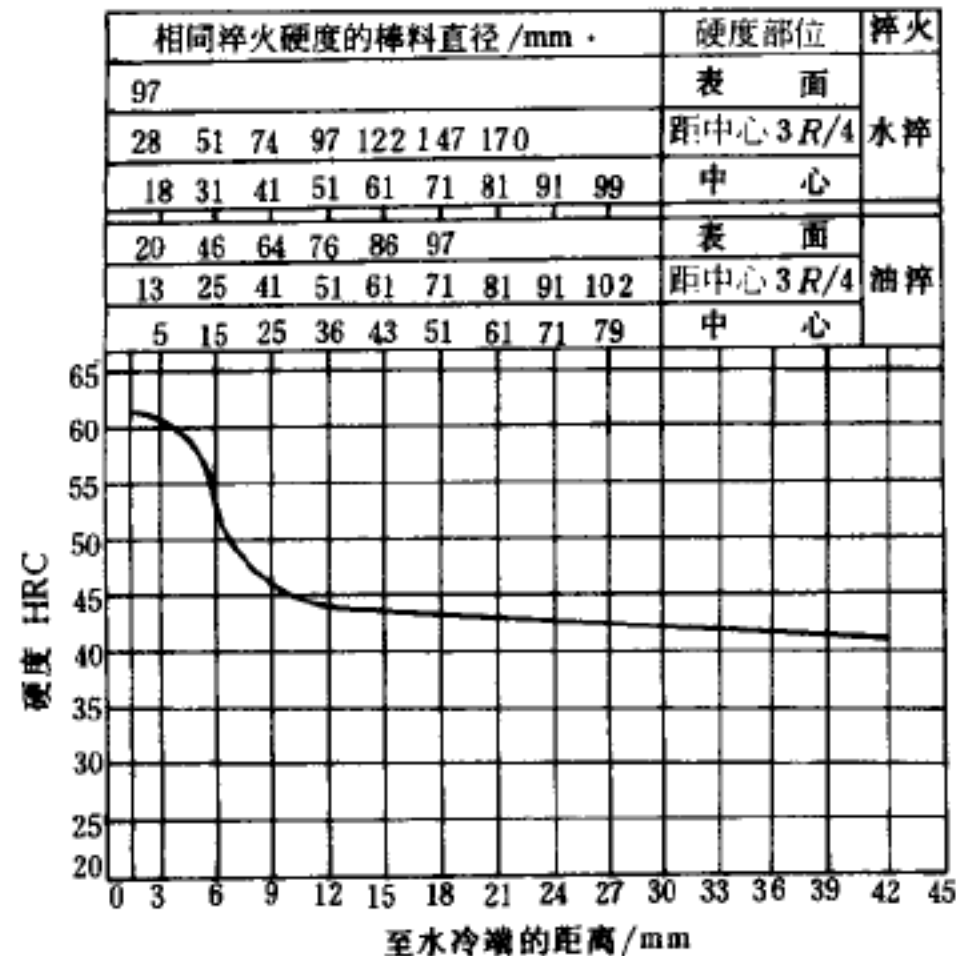
表图 5.3-97 GCr15SiMn 钢



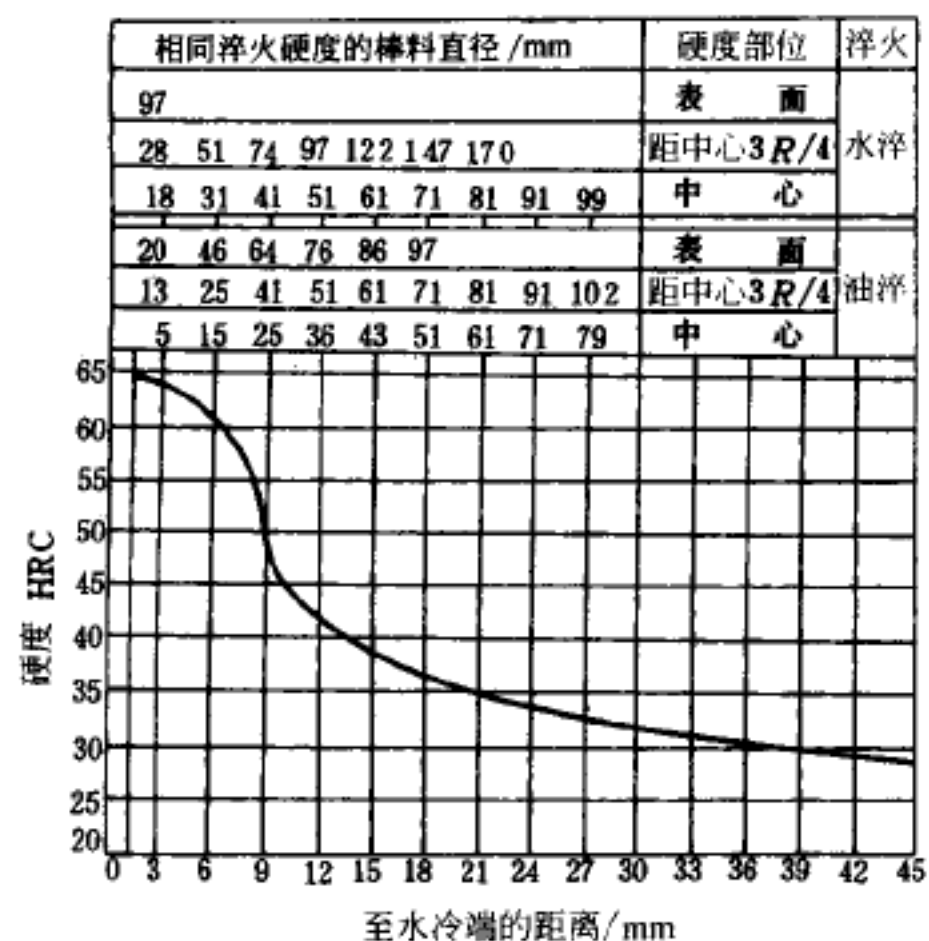
表图 5.3-98 GSiMnMoV 钢



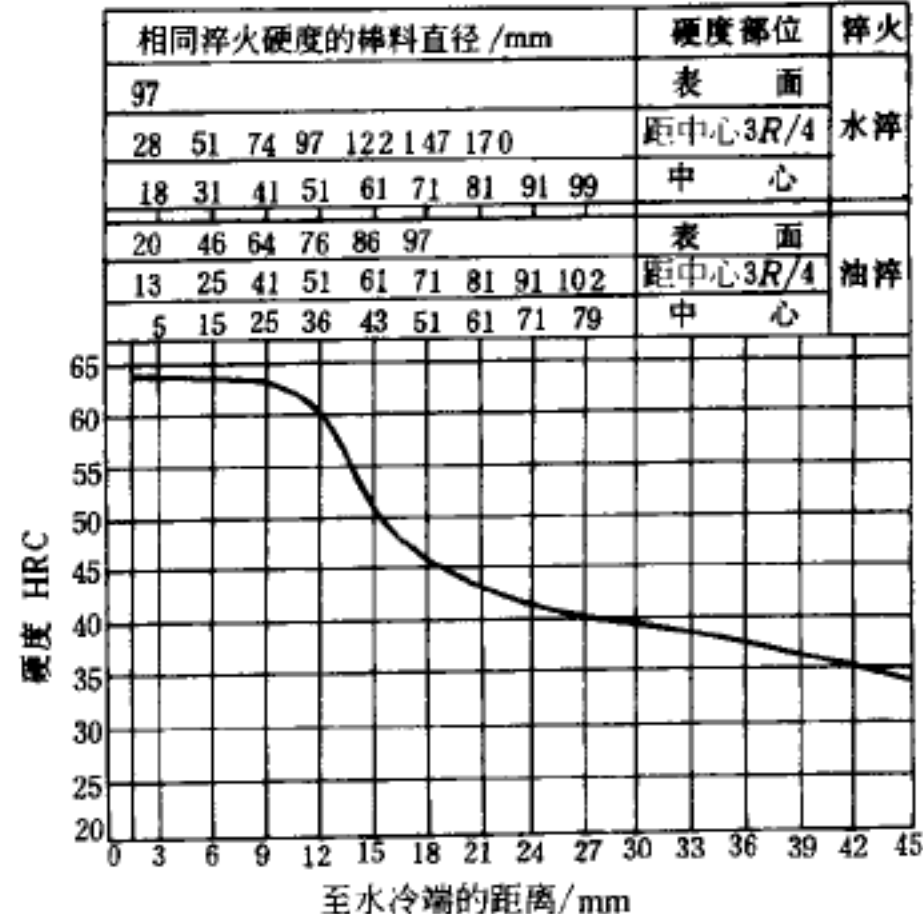
表图 5.3-99 GSiMnMoVRE 钢



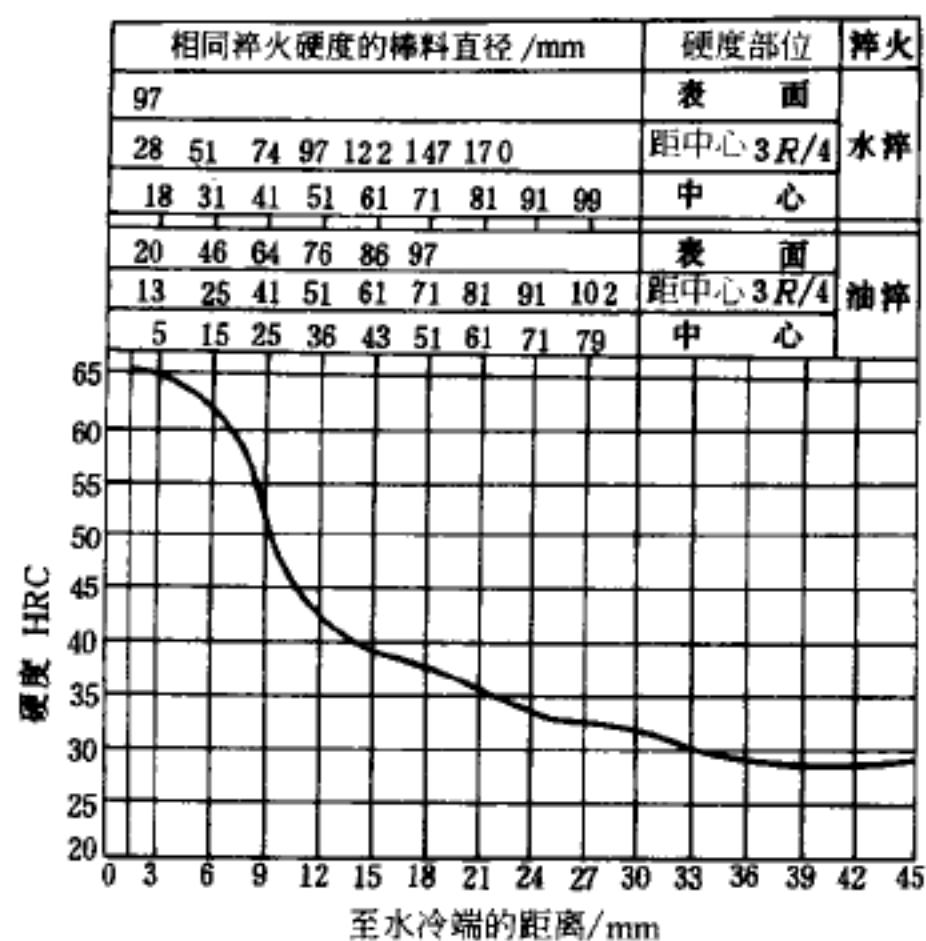
表图 5.3-100 T9 钢



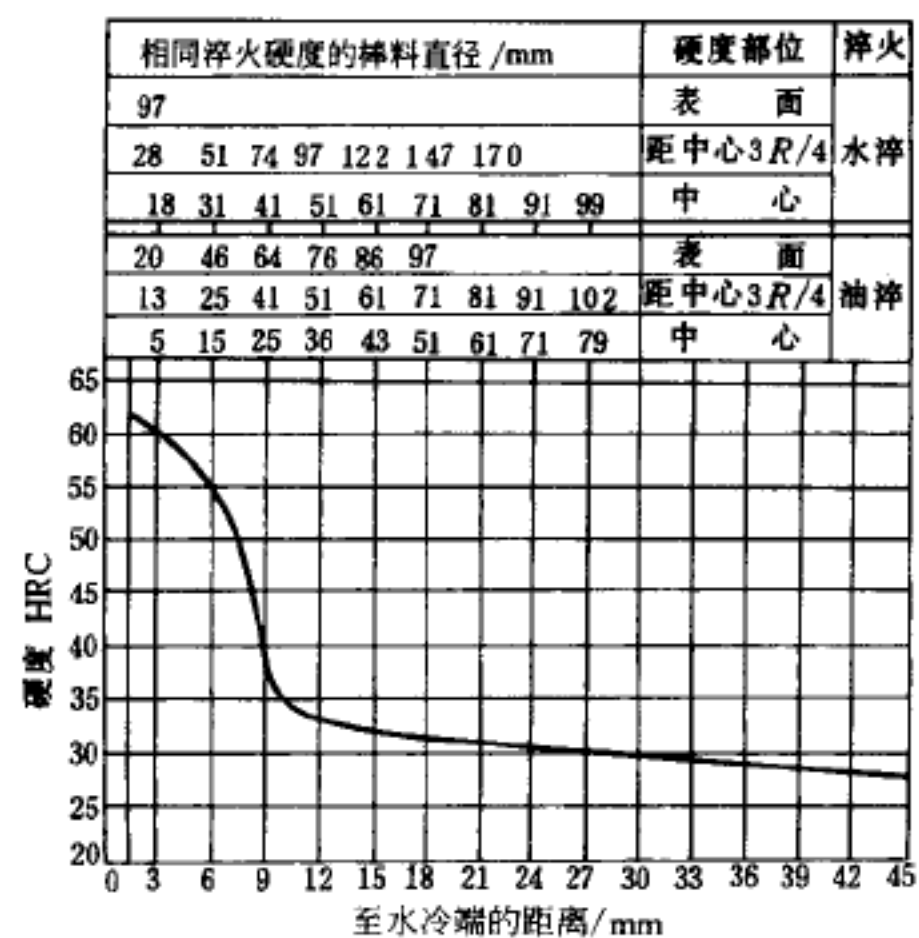
表图 5.3-101 T12A 钢



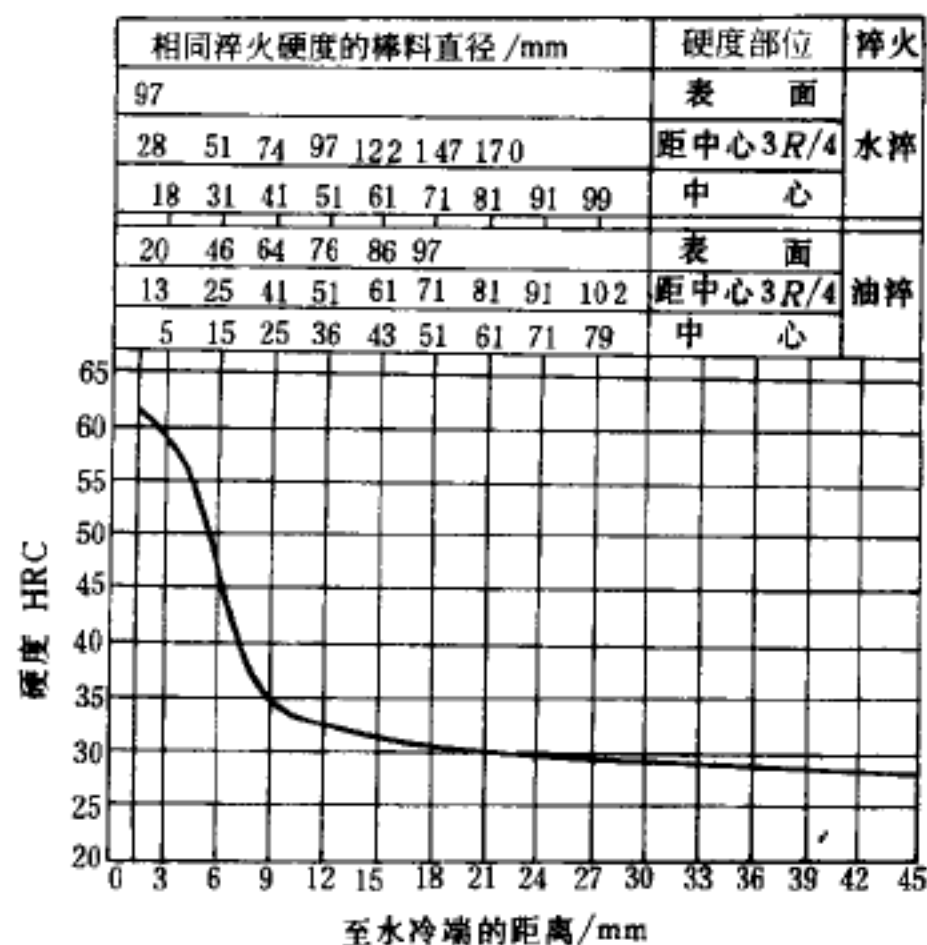
表图 5.3-102 9Mn2V 钢



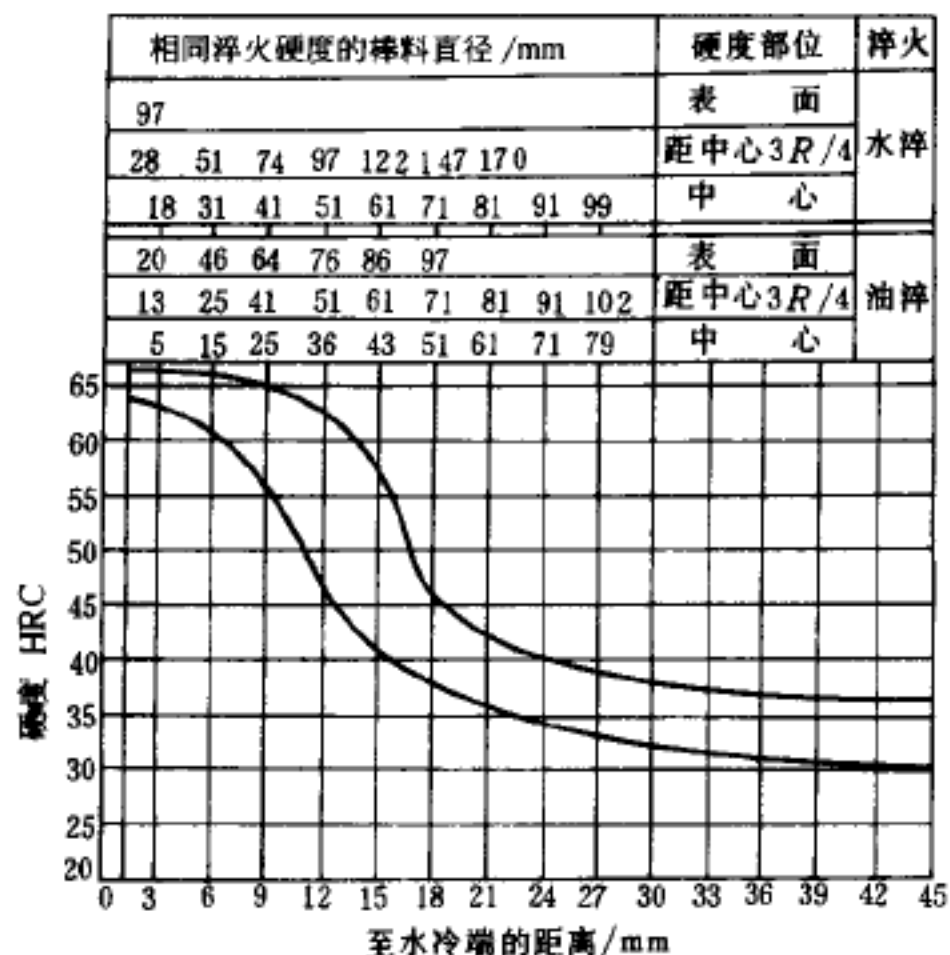
表图 5.3-103 SiMn 钢



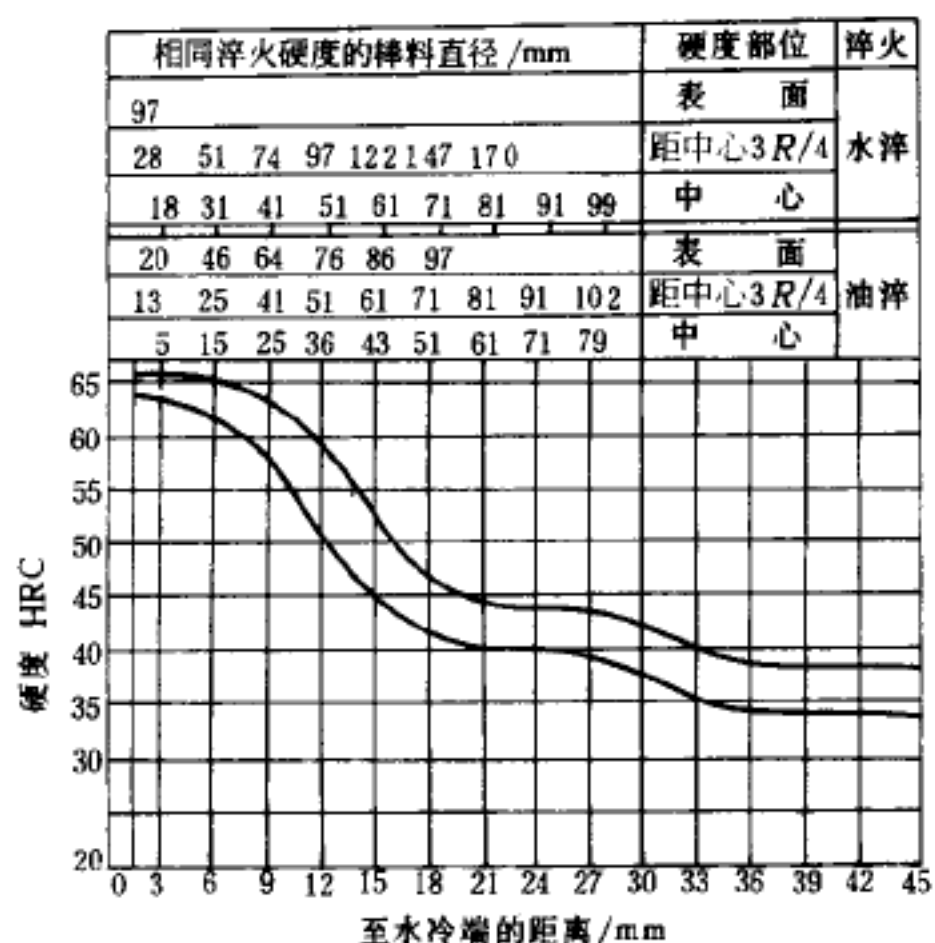
表图 5.3-104 6SiMnV 钢



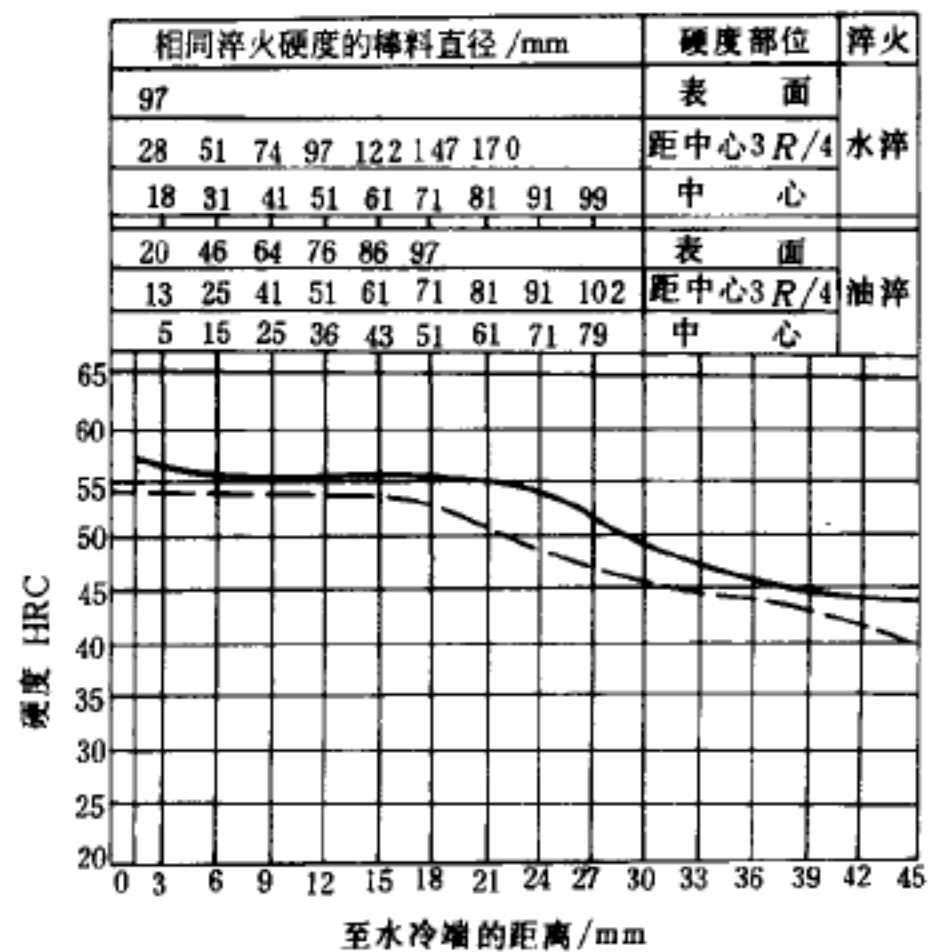
表图 5.3-105 5SiMnMoV 钢



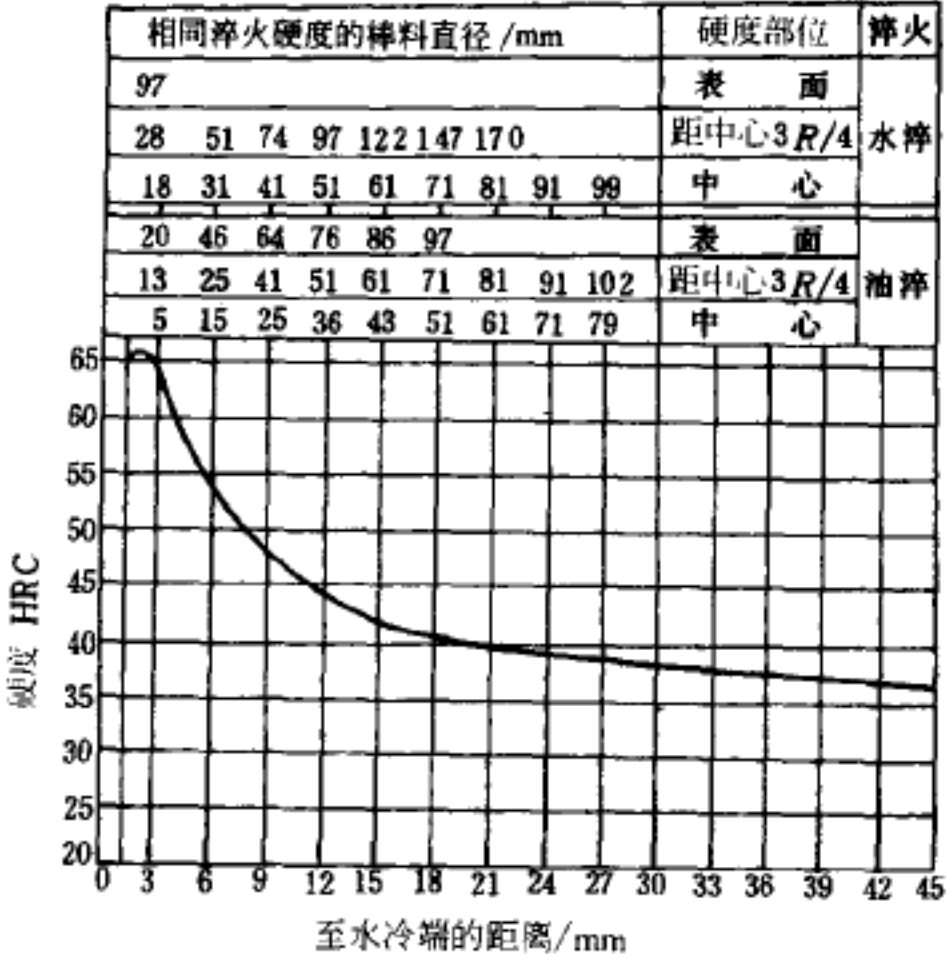
表图 5.3-106 9CrSi 钢



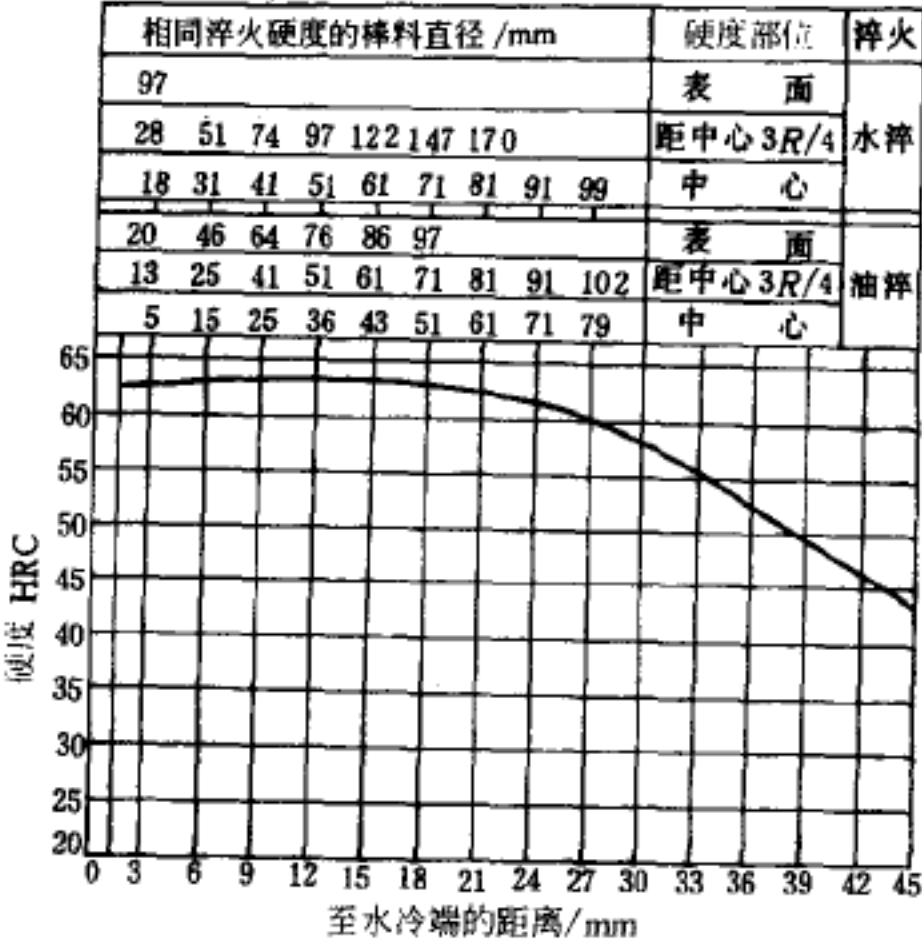
表图 5.3-107 Cr2 钢



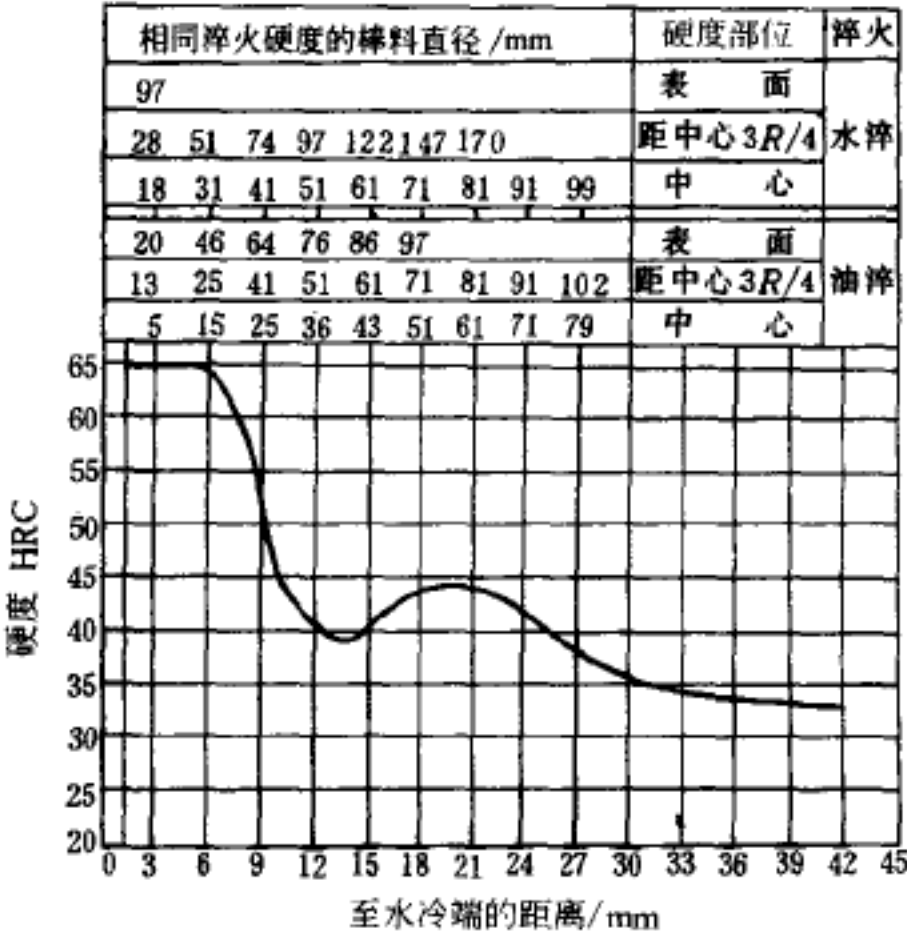
表图 5.3-108 4CrMnMo 钢



表图 5.3-109 CrW 钢



表图 5.3-110 9CrWMn 钢



表图 5.3-111 CrV 钢

5.4 淬火、回火钢的力学性能（表 5-4、表图 5.4-1 ~ 表图 5.4-130）

表 5-4 常用钢淬火、回火后的力学性能曲线

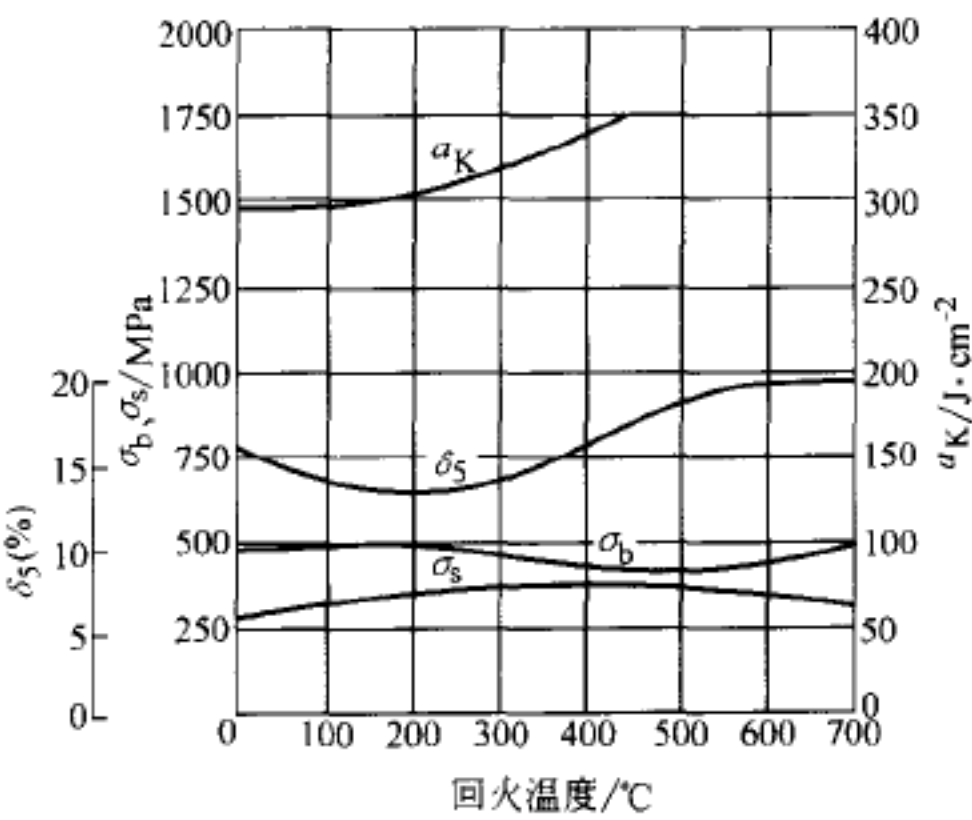
序 号	钢 号	图 号	序 号	钢 号	图 号
1	10	表图 5.4-1	9	50	表图 5.4-9
2	15	表图 5.4-2	10	55	表图 5.4-10
3	20	表图 5.4-3	11	40	表图 5.4-11
4	25	表图 5.4-4	12	15Mn	表图 5.4-12
5	30	表图 5.4-5	13	20Mn	表图 5.4-13
6	35	表图 5.4-6	14	30Mn	表图 5.4-14
7	40	表图 5.4-7	15	40Mn	表图 5.4-15
8	45	表图 5.4-8	16	50Mn	表图 5.4-16

(续)

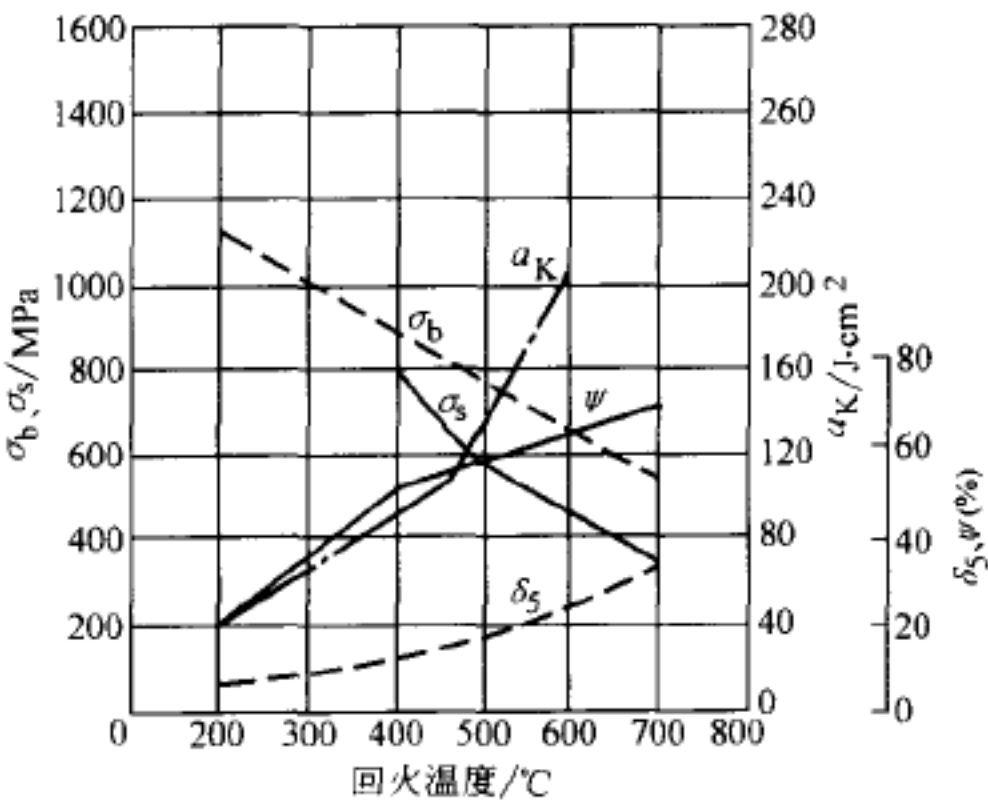
序 号	钢 号	图 号	序 号	钢 号	图 号
17	50Mn	表图 5.4-17	54	30CrMnSiA	表图 5.4-54
18	35Mn2	表图 5.4-18	55	15CrMnMo	表图 5.4-55
19	50Mn2	表图 5.4-19	56	20CrMnMo	表图 5.4-56
20	25Mn2V	表图 5.4-20	57	40CrMnMo	表图 5.4-57
21	35SiMn	表图 5.4-21	58	18CrMnTi	表图 5.4-58
22	42SiMn	表图 5.4-22	59	20CrMnTi	表图 5.4-59
23	45B	表图 5.4-23	60	35CrMnTi	表图 5.4-60
24	40MnB	表图 5.4-24	61	40CrMnTi	表图 5.4-61
25	20Mn2B	表图 5.4-25	62	40CrB	表图 5.4-62
26	40MnVB	表图 5.4-26	63	40CrNiMoA	表图 5.4-63
27	20MnTiB	表图 5.4-27	64	18CrMn2MoVA	表图 5.4-64
28	20MnMoB	表图 5.4-28	65	15CrMnMoVA	表图 5.4-65
29	15Cr	表图 5.4-29	66	20CrMnMoVB	表图 5.4-66
30	20Cr	表图 5.4-30	67	18CrNiWA	表图 5.4-67
31	30Cr	表图 5.4-31	68	65	表图 5.4-68
32	38CrA	表图 5.4-32	69	85	表图 5.4-69
33	40CrA	表图 5.4-33	70	65Mn	表图 5.4-70
34	40Cr	表图 5.4-34	71	60Si2Mn	表图 5.4-71
35	50Cr	表图 5.4-35	72	55SiMnVB	表图 5.4-72
36	20CrNi	表图 5.4-36	73	50CrMn	表图 5.4-73
37	40CrNi	表图 5.4-37	74	50CrMnVA	表图 5.4-74
38	12CrNi3	表图 5.4-38	75	50CrVA	表图 5.4-75
39	20CrNi3A	表图 5.4-39	76	55SiMnMoV	表图 5.4-76
40	37CrNi3A	表图 5.4-40	77	55SiMnMoVNB	表图 5.4-77
41	12Cr2Ni4A	表图 5.4-41	78	GCr6	表图 5.4-78
42	40CrNiMoA	表图 5.4-42	79	GCr6SiMn	表图 5.4-79
43	30CrMoA	表图 5.4-43	80	GCr9	表图 5.4-80
44	42CrMo	表图 5.4-44	81	GCr9SiMn	表图 5.4-81
45	35CrMoV	表图 5.4-45	82	GCr15	表图 5.4-82
46	40Cr2MoV	表图 5.4-46	83	GCr15SiMn	表图 5.4-83
47	38CrMoAl	表图 5.4-47	84	GCrMnMoV	表图 5.4-84
48	20CrV	表图 5.4-48	85	1Cr13	表图 5.4-85
49	40CrVA	表图 5.4-49	86	2Cr13	表图 5.4-86
50	45CrV	表图 5.4-50	87	1Cr17Ni2	表图 5.4-87
51	20CrMn	表图 5.4-51	88	9Cr18	表图 5.4-88
52	35CrMn2	表图 5.4-52	89	Cr11MoV	表图 5.4-89
53	30CrMnSi	表图 5.4-53	90	4Cr9Si	表图 5.4-90

(续)

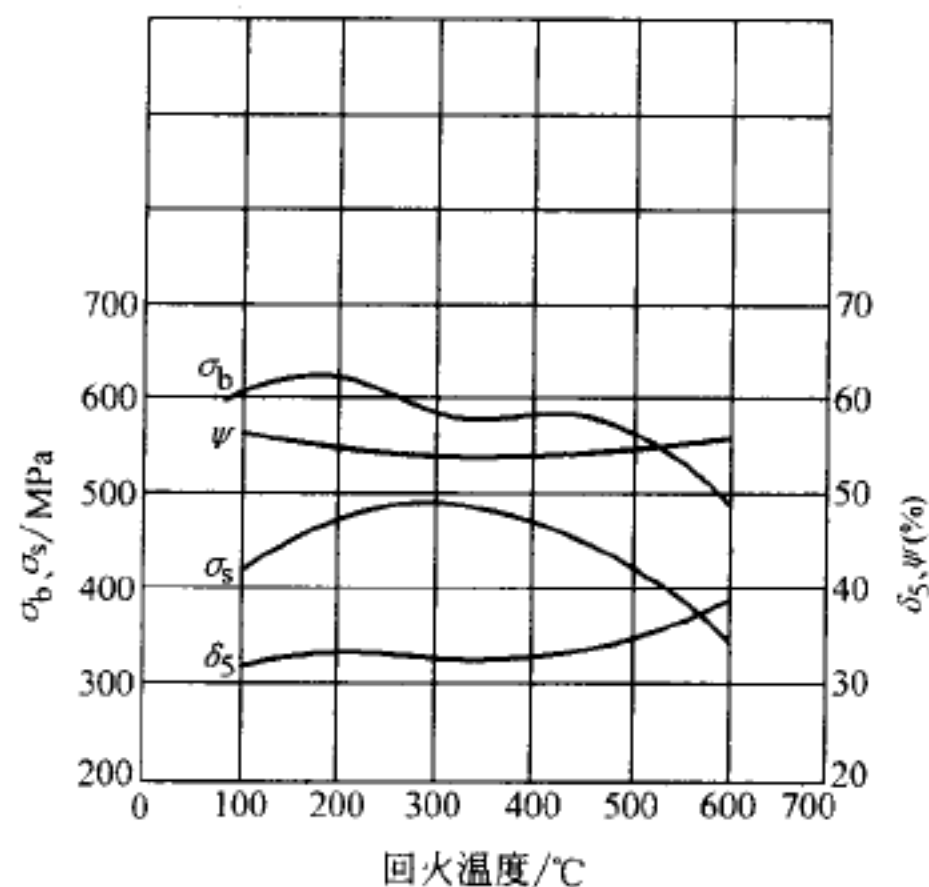
序 号	钢 号	图 号	序 号	钢 号	图 号
91	4Cr10Si2Mo	表图 5.4-91	111	Cr12Mo	表图 5.4-111
92	T7、T7A	表图 5.4-92	112	Cr12MoV	表图 5.4-112
93	T8、T8A	表图 5.4-93	113	Cr6WV	表图 5.4-113
94	T8Mn	表图 5.4-94	114	9Mn2	表图 5.4-114
95	T9	表图 5.4-95	115	9Mn2V	表图 5.4-115
96	T10、T10A	表图 5.4-96	116	Cr4W2MoV	表图 5.4-116
97	T11、T11A	表图 5.4-97	117	SiMn	表图 5.4-117
98	T12、T12A	表图 5.4-98	118	3Cr2W8V	表图 5.4-118
99	Cr06	表图 5.4-99	119	5CrNiMo	表图 5.4-119
100	Cr2	表图 5.4-100	120	5CrMnMo	表图 5.4-120
101	CrMn	表图 5.4-101	121	4Cr5W2SiV	表图 5.4-121
102	CrWMn	表图 5.4-102	122	5SiMnMoV	表图 5.4-122
103	CrW5	表图 5.4-103	123	6SiMnV	表图 5.4-123
104	9Cr2	表图 5.4-104	124	5W2CrSiV	表图 5.4-124
105	9CrSi	表图 5.4-105	125	W18Cr4V	表图 5.4-125
106	SiCr	表图 5.4-106	126	W9Cr4V2	表图 5.4-126
107	9SiCr	表图 5.4-107	127	W6Mo5Cr4V2	表图 5.4-127
108	W	表图 5.4-108	128	W6Mo5Cr4V2Al	表图 5.4-128
109	V	表图 5.4-109	129	W2Mo10Cr4VCo8	表图 5.4-129
110	Cr12	表图 5.4-110	130	W12Mo3Cr4V3Co6Si	表图 5.4-130



表图 5.4-1 10 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.10,
Si0.15 ~ 0.35, Mn0.35 ~ 0.60。水淬

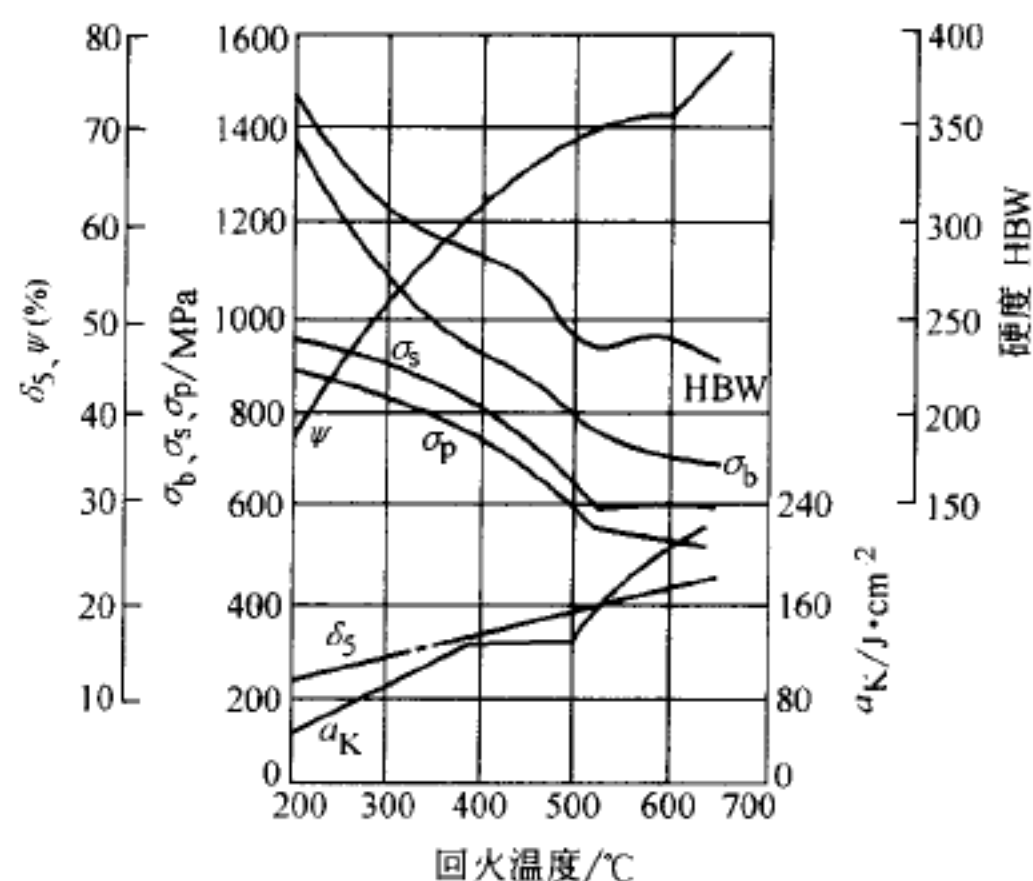


表图 5.4-2 15 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.13,
Si0.34, Mn0.44。100℃水淬



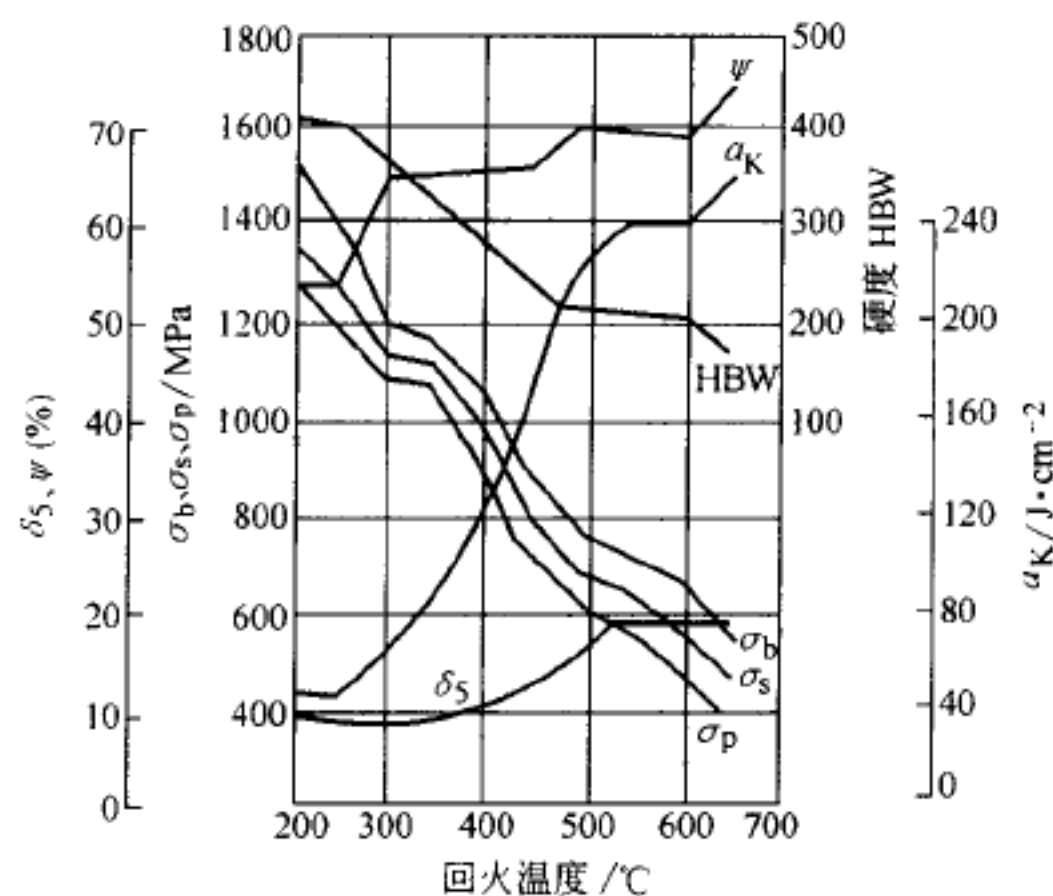
表图 5.4-3 20 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.21, Si0.25, Mn0.57, 940℃正火, 930℃水淬, 回火 1h 空冷



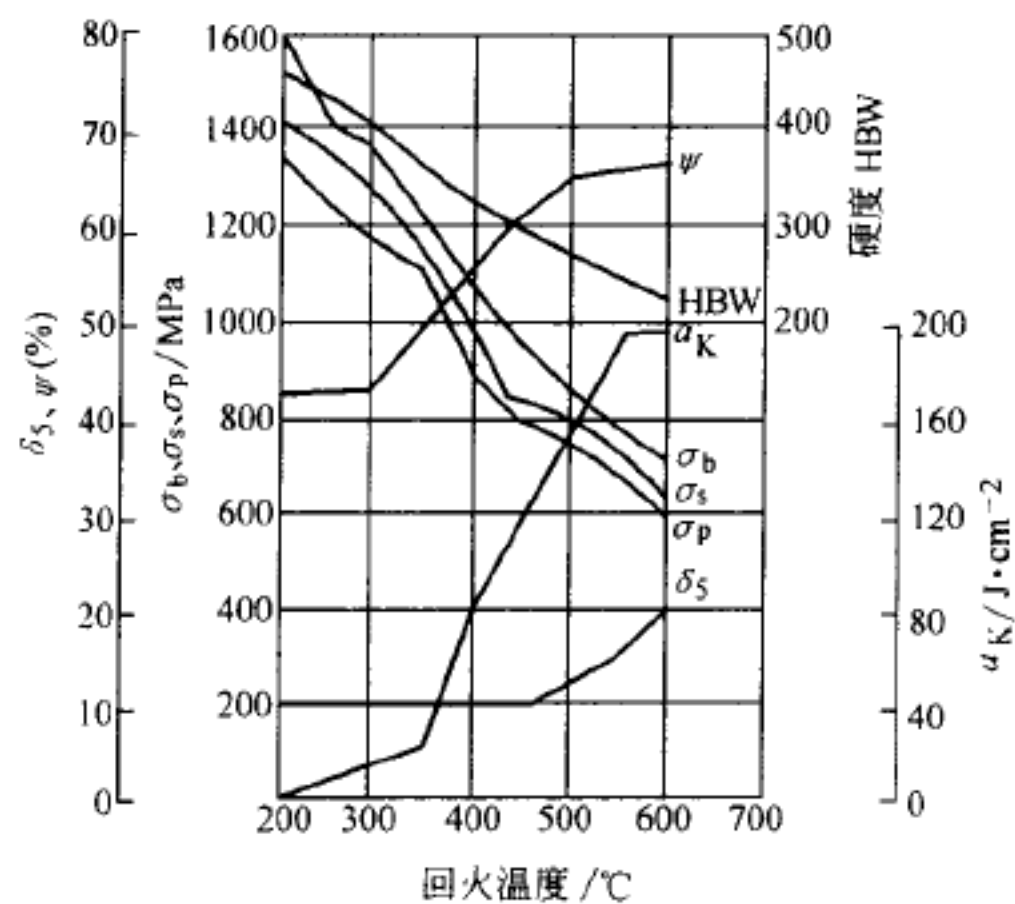
表图 5.4-4 25 钢

800℃水淬, 试样尺寸: $\phi 10\text{mm} \times 100\text{mm}$



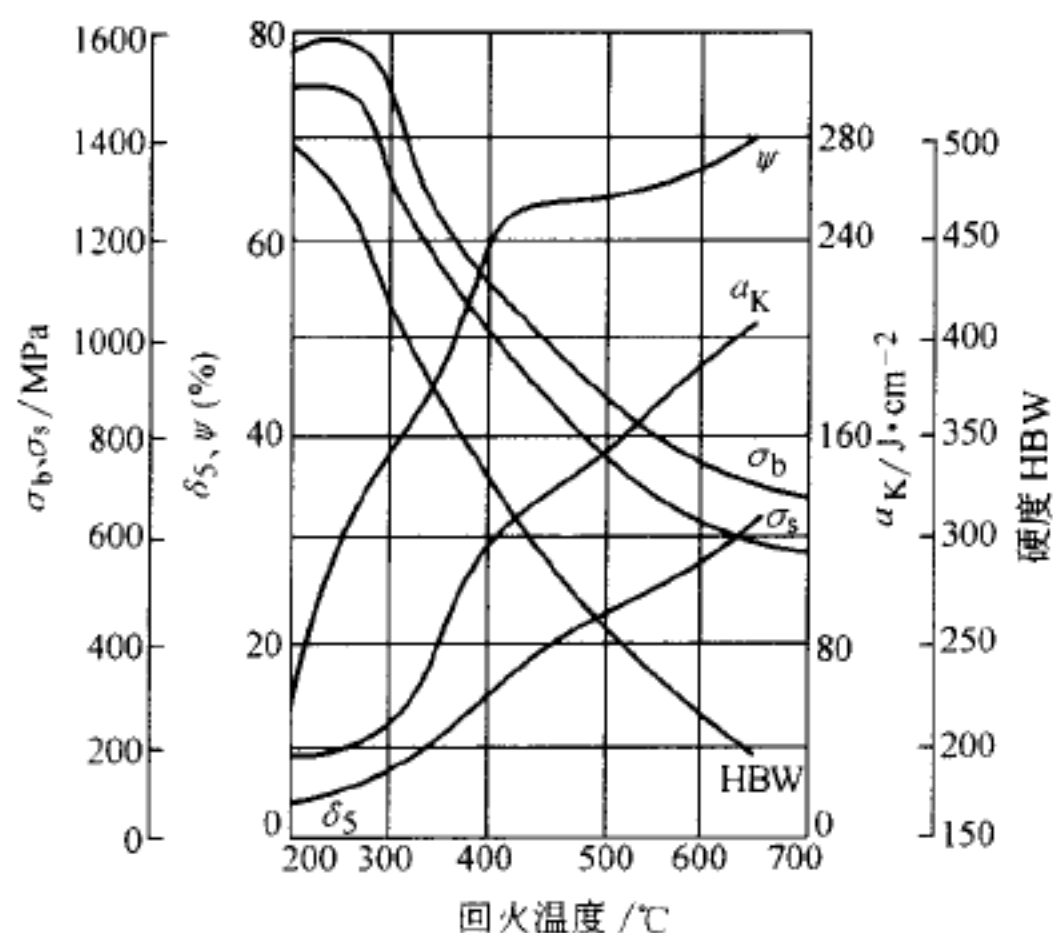
表图 5.4-5 30 钢

800℃淬火, 试样 $\phi 10\text{mm} \times 100\text{mm}$



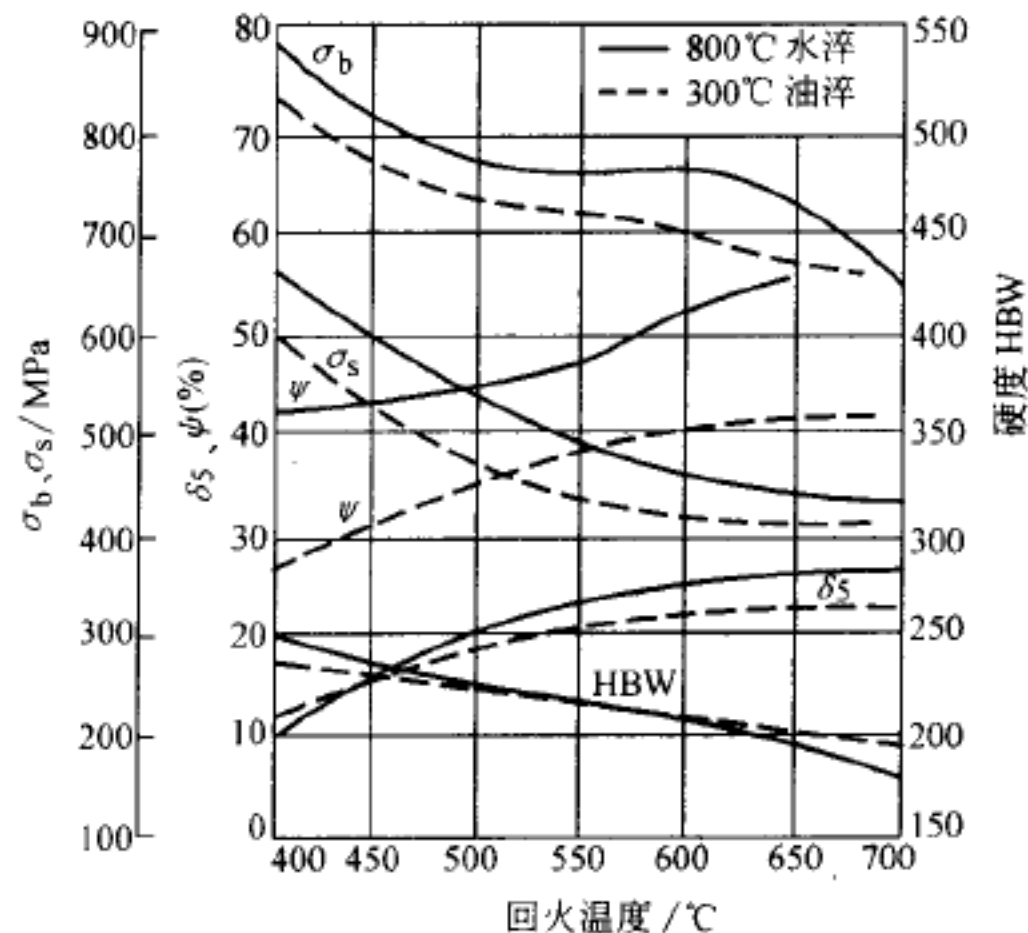
表图 5.4-6 35 钢

860℃水淬, 试样 $\phi 10\text{mm} \times 100\text{mm}$



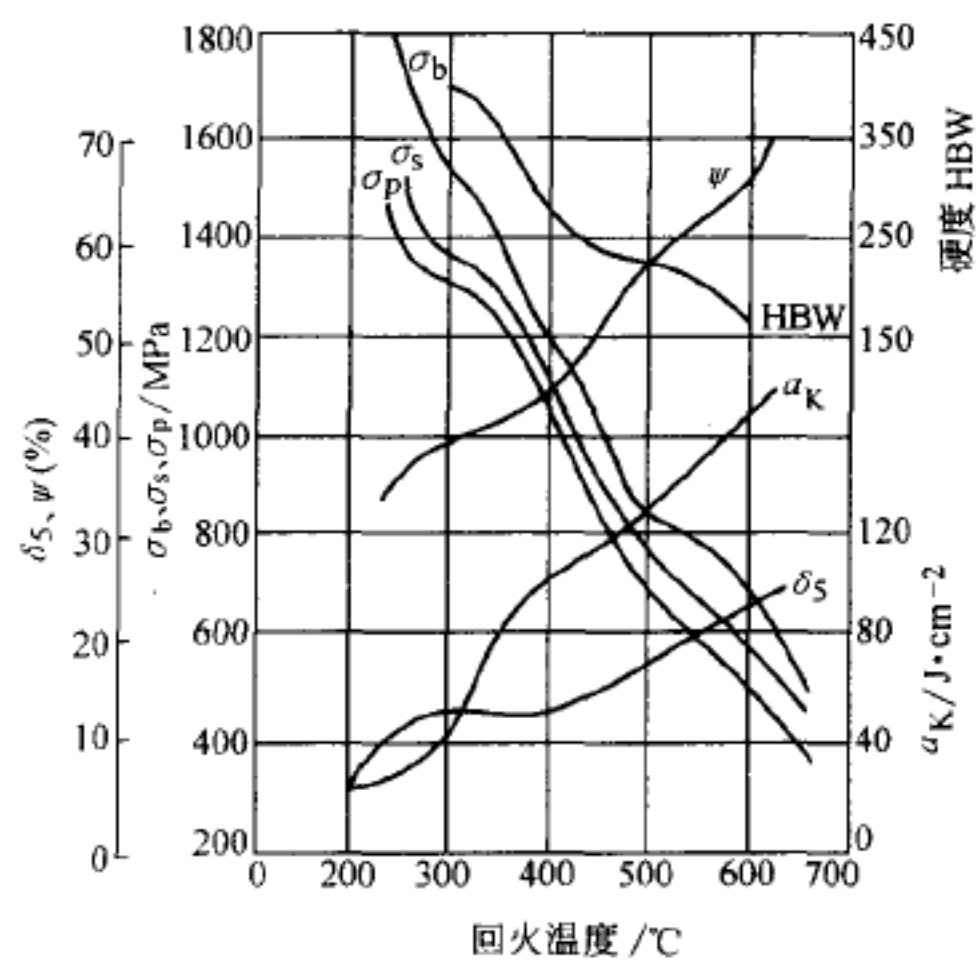
表图 5.4-7 40 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.43, Si0.27, Mn0.61, Cr0.05, Ni0.10, 870℃正火, 840℃水淬, 试样 $\phi 8\text{mm}$

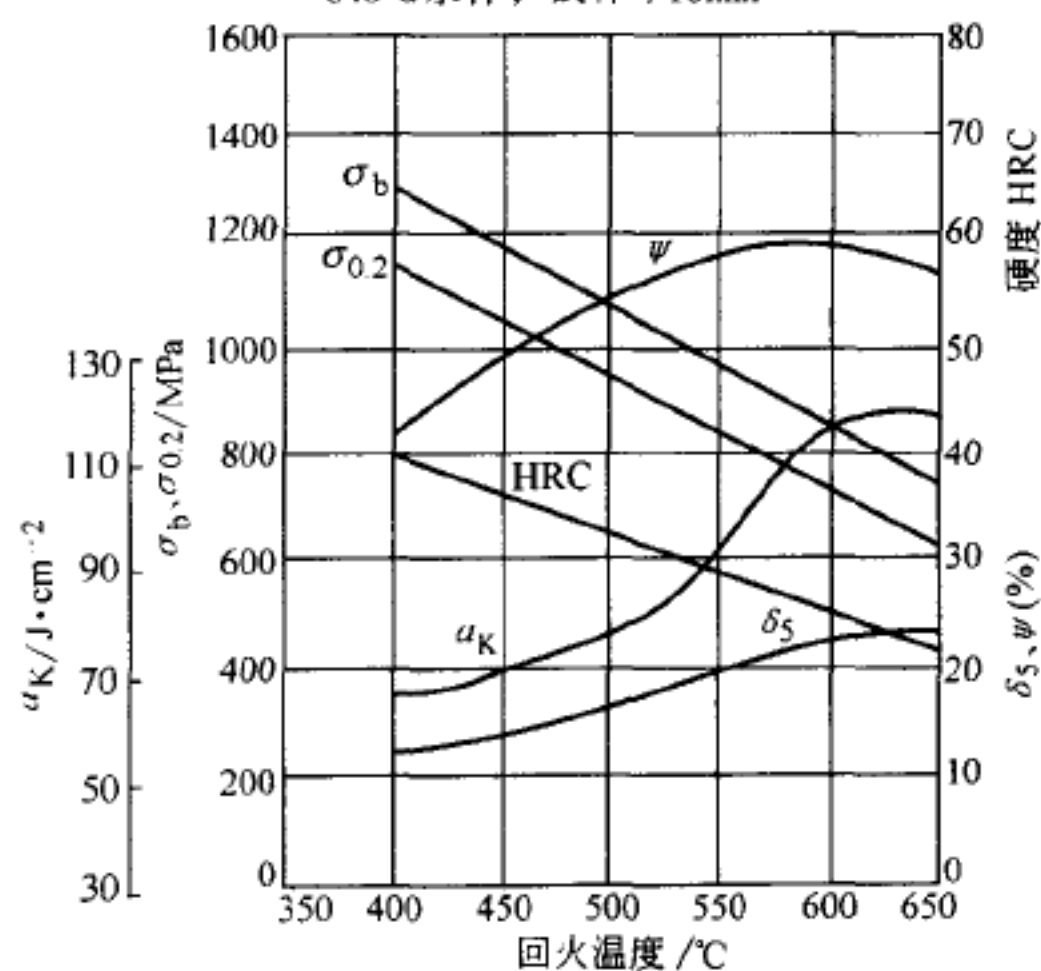


表图 5.4-8 45 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.40 ~ 0.50, Mn0.50 ~ 0.80

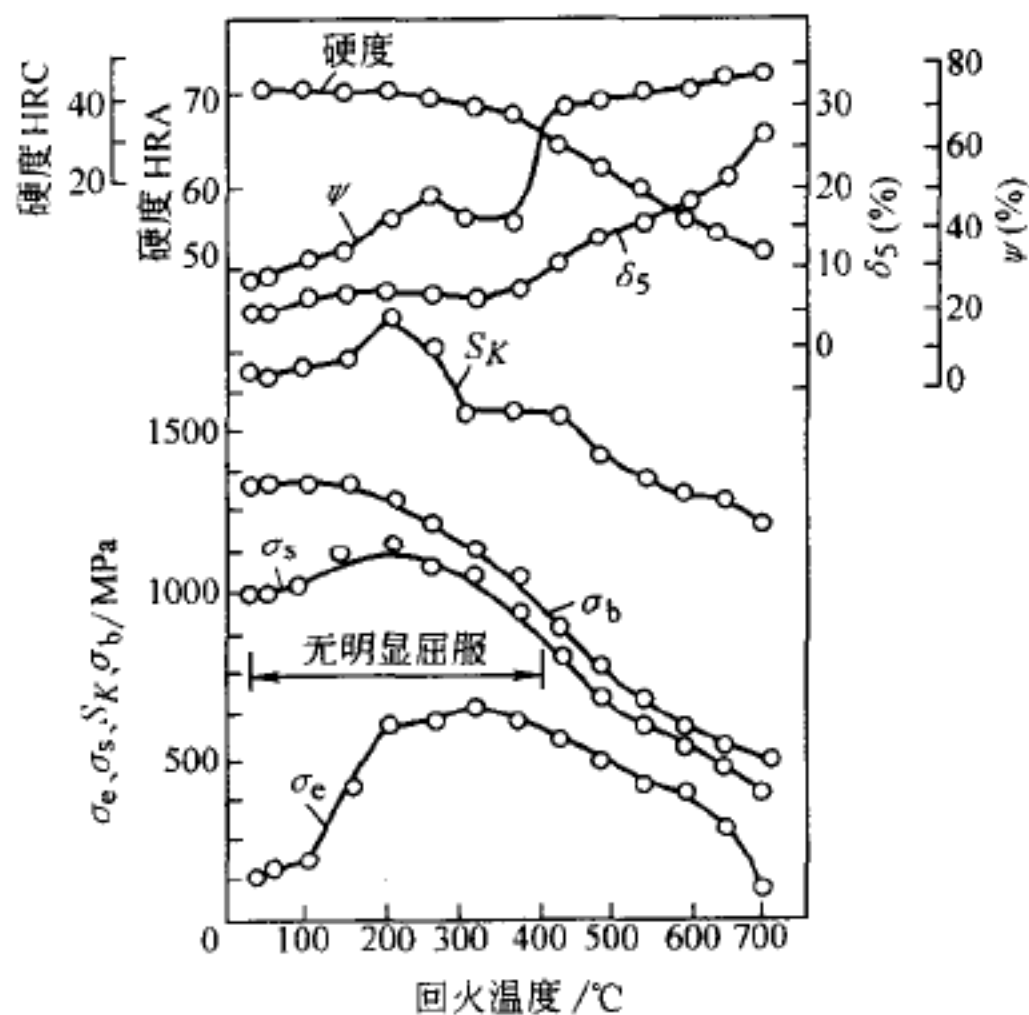


表图 5.4-9 50 钢

840℃ 水淬, 试样 $\phi 10\text{mm}$ 

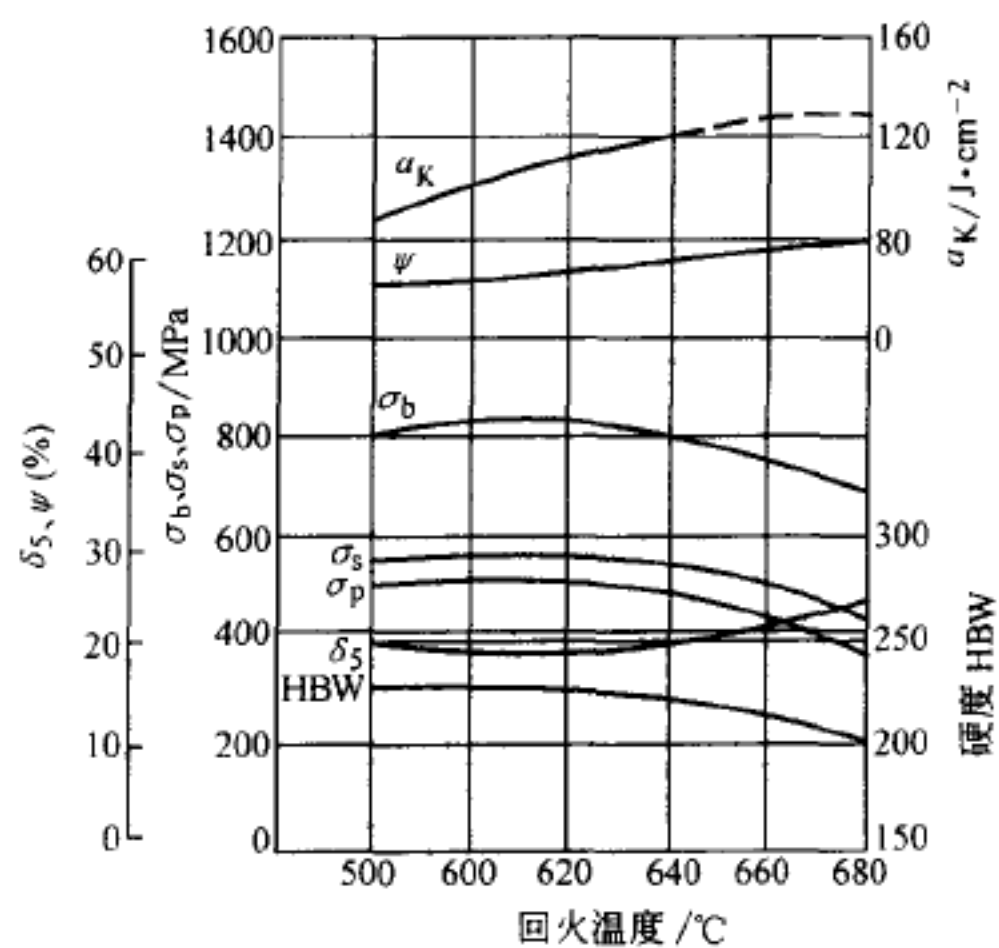
表图 5.4-11 60 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.63, Si0.30, Mn0.67。810℃ 水淬 2s 后油冷



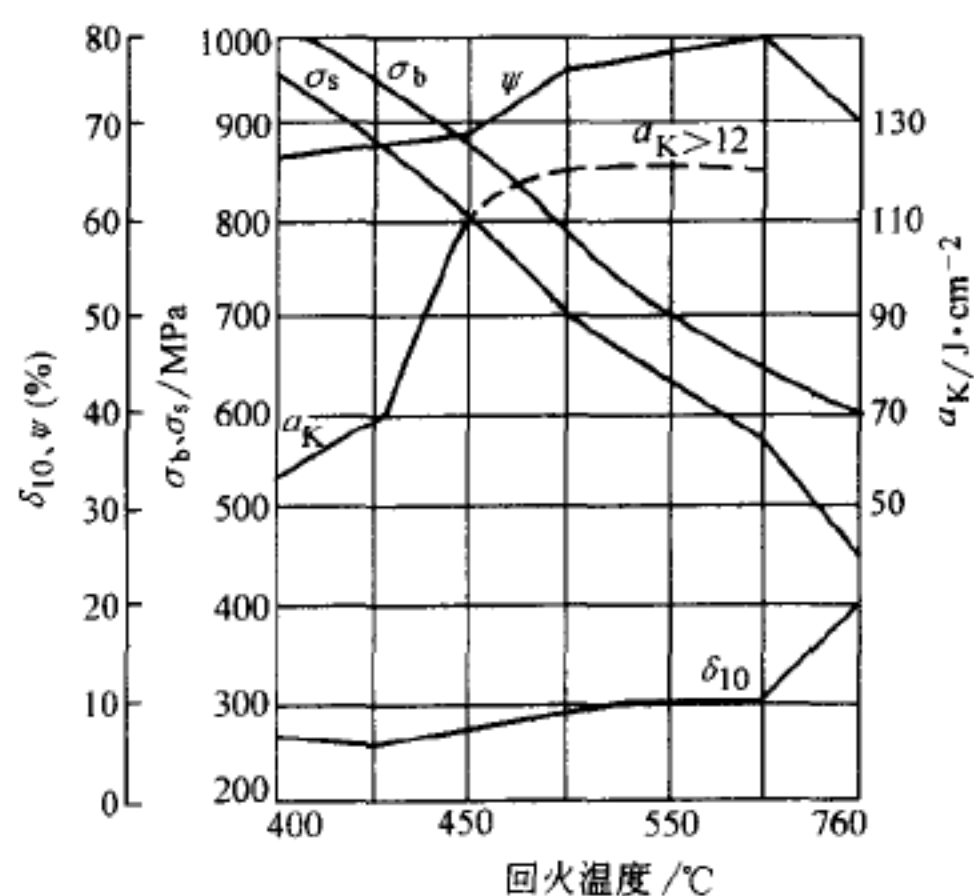
表图 5.4-13 20Mn 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.20, Mn0.89。910℃ 淬火



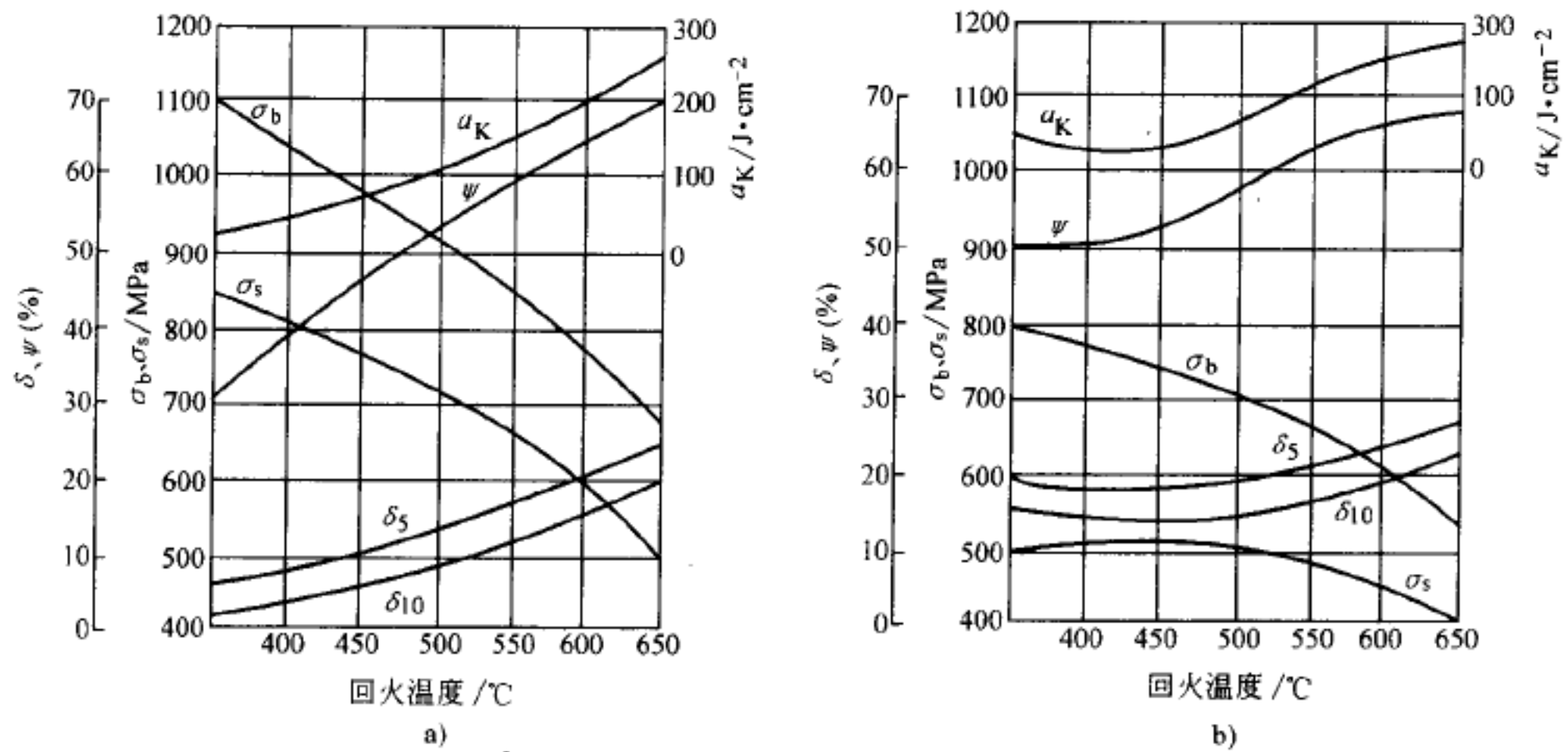
表图 5.4-10 55 钢

820℃ 水淬



表图 5.4-12 15Mn 钢

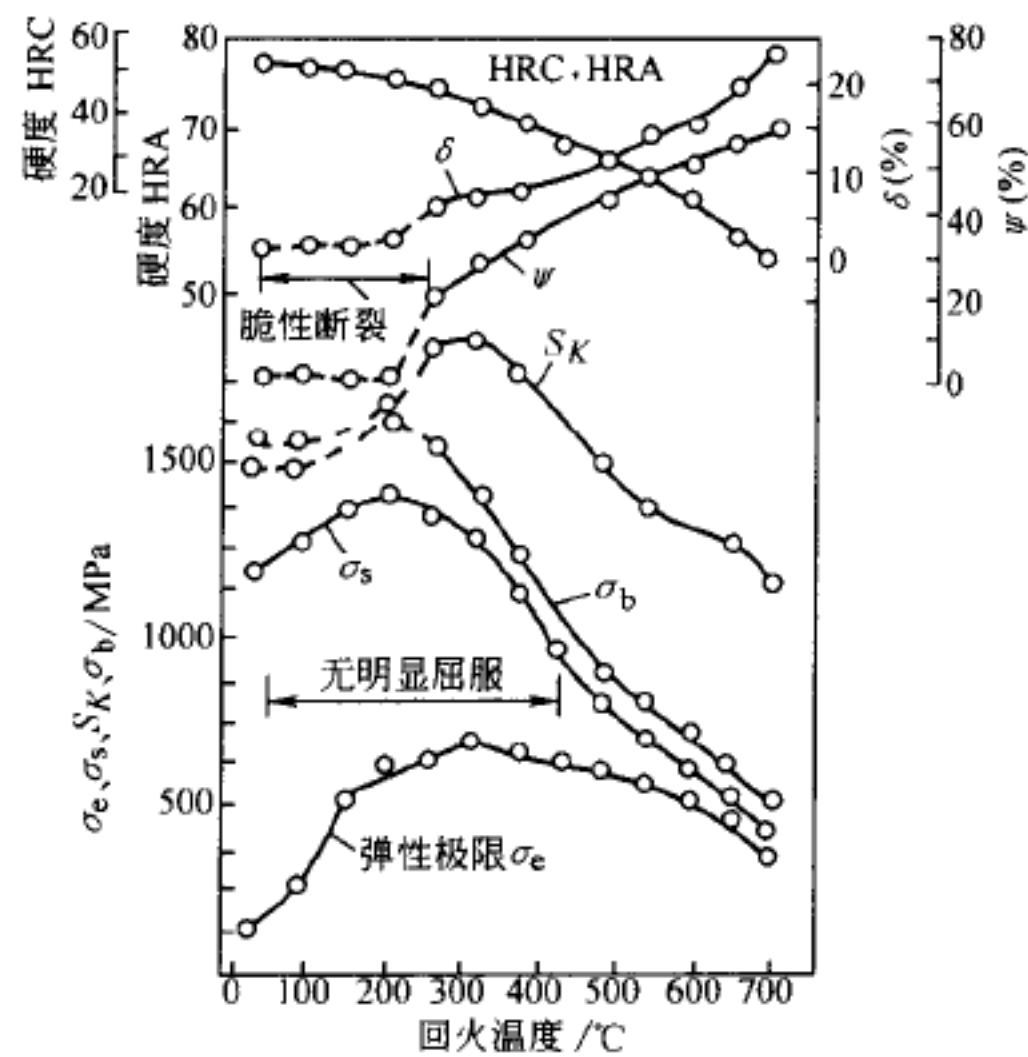
化学成分 (质量分数) (%): C0.19, Si0.26, Mn0.96。900℃ 正火, 890℃ 水淬, 回火后油冷
试样尺寸: $\phi 23\text{mm}$



表图 5.4-14 30Mn 钢

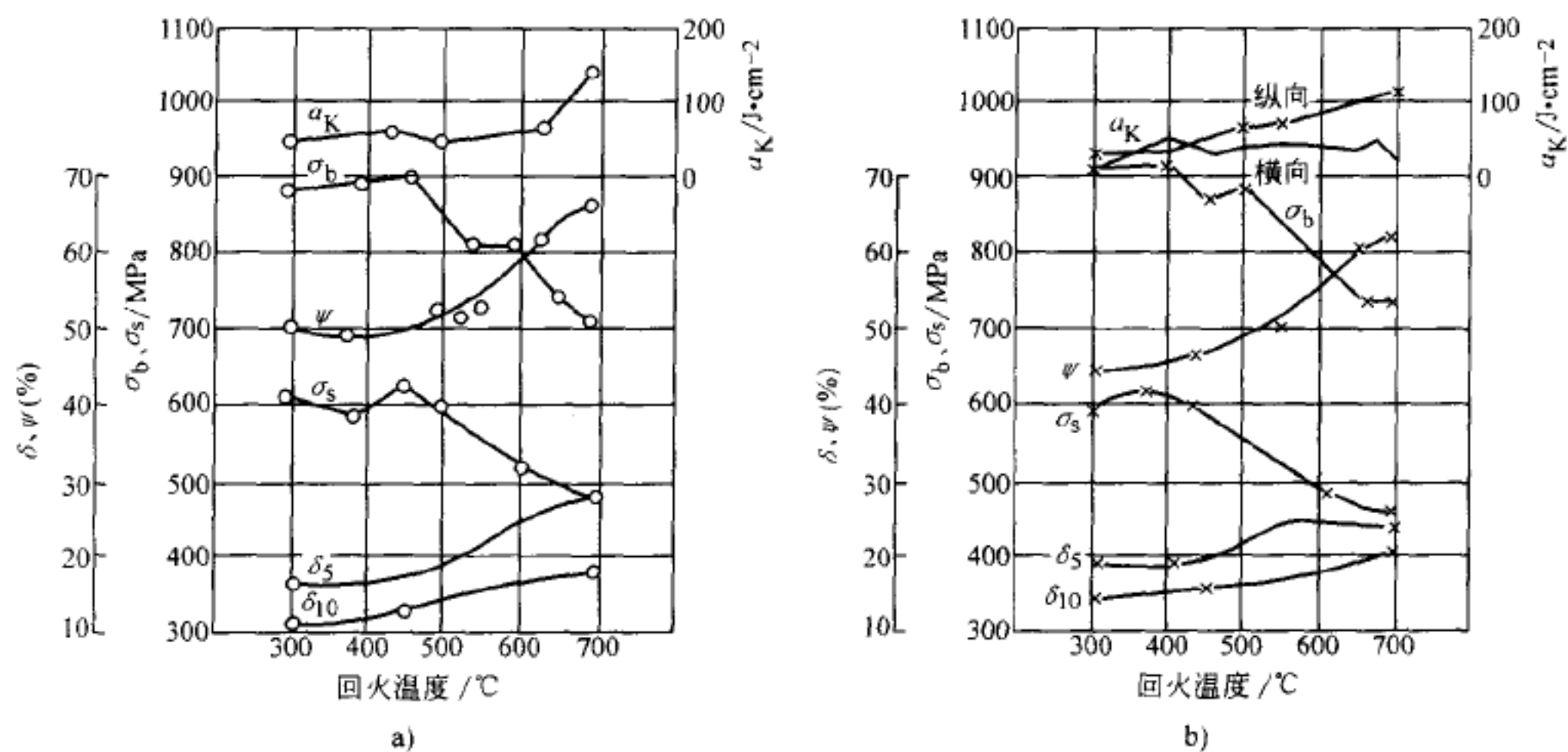
化学成分 (质量分数) (%): C0.32, Si0.29, Mn0.83

a) 800°C 水淬 b) 840°C 油淬



表图 5.4-15 40Mn 钢

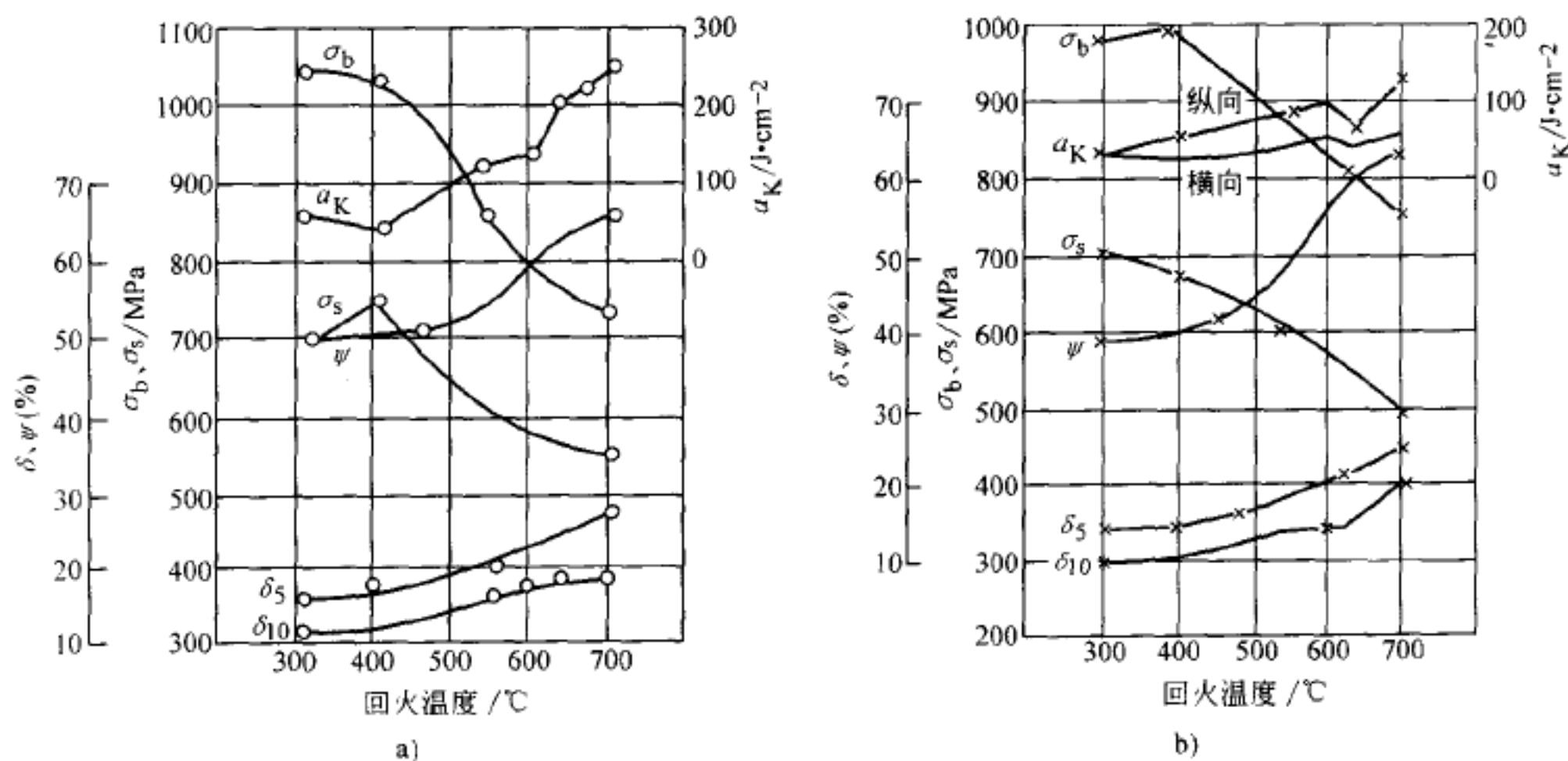
化学成分 (质量分数) (%): C0.41, Mn0.72。840°C 淬火



表图 5.4-16 50Mn 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.46, Si0.21, Mn0.80。

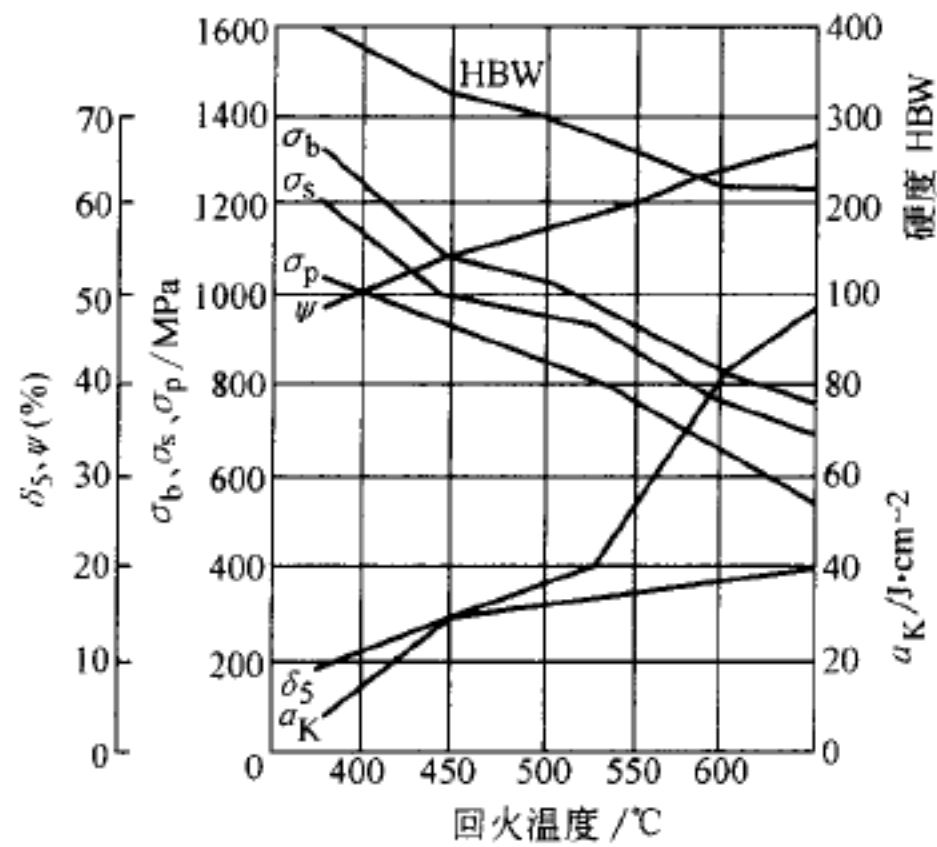
850°C 油淬, 夏氏冲击试样尺寸: a) 35mm x 35mm b) 70mm x 70mm



表图 5.4-17 50Mn 钢

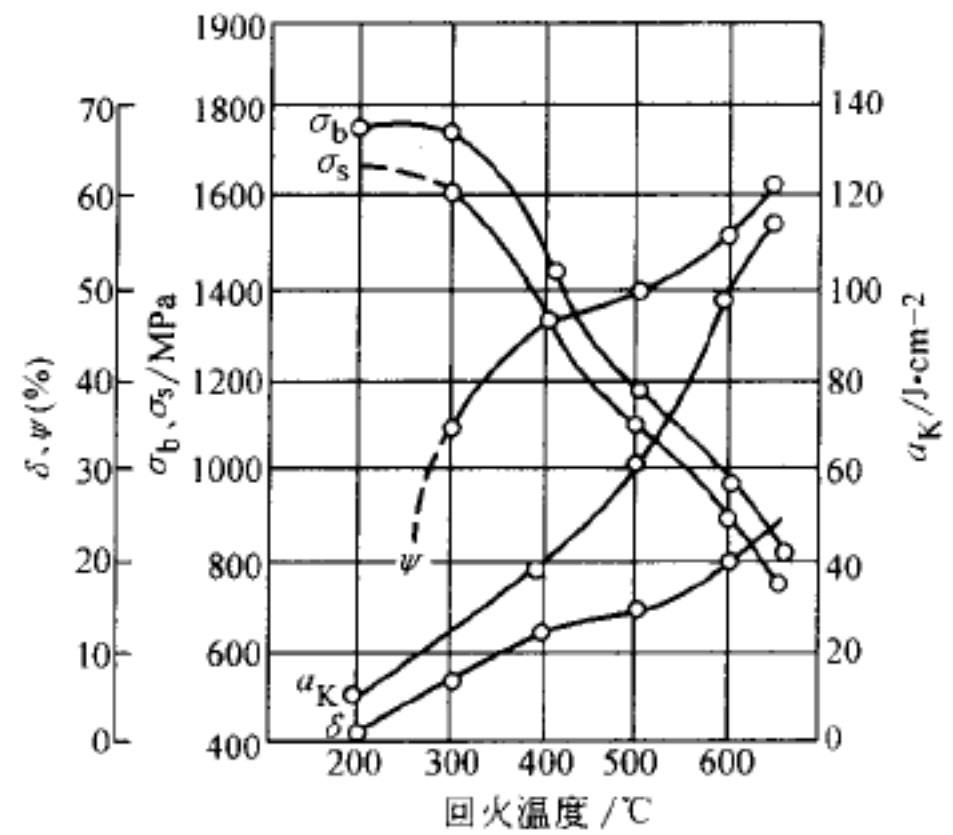
化学成分 (质量分数) (%): C0.46, Si0.21, Mn0.80。

800°C 水淬, 夏氏冲击试样尺寸: a) 35mm x 35mm b) 70mm x 70mm



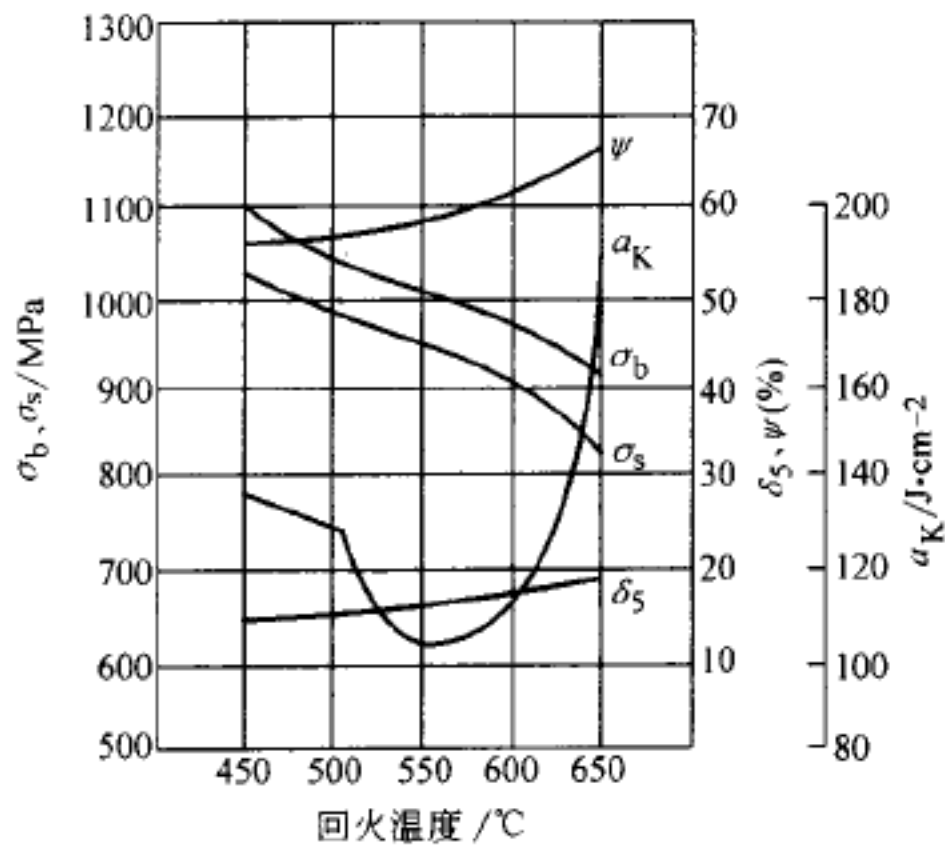
表图 5.4-18 35Mn2 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.38, Si0.28,
Mn1.80, Cr0.21, Ni0.32。820℃水淬,
回火后油冷; 试样尺寸: $\phi 25\text{mm} \times 350\text{mm}$



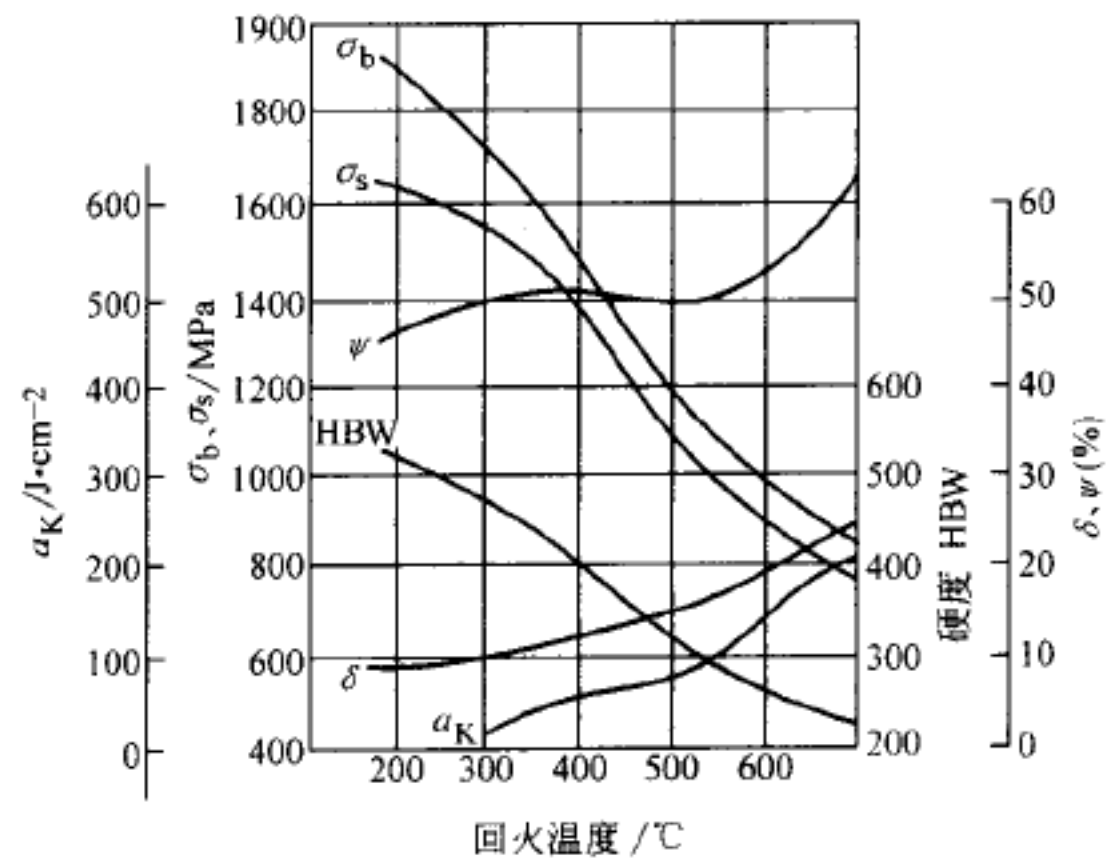
表图 5.4-19 50Mn2 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.50, Si0.20, Mn1.46



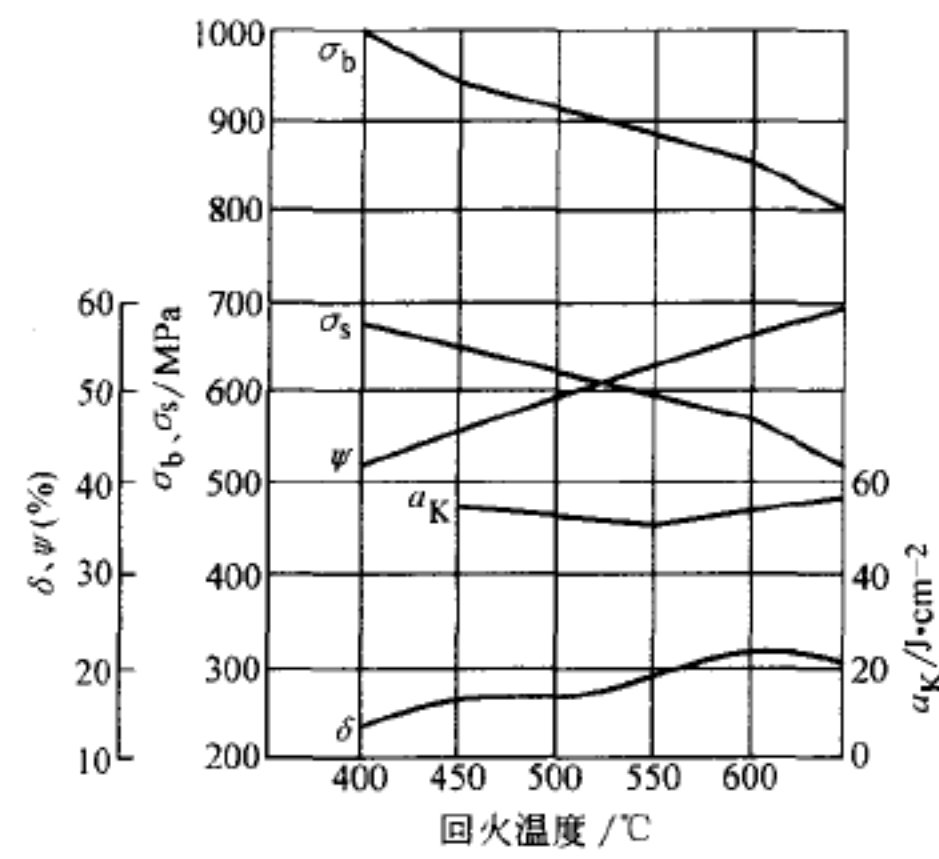
表图 5.4-20 25Mn2V 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.29, Si0.13,
Mn1.89, V0.18。880℃油淬, 回火后油冷;
试样毛坯尺寸: $\phi 25\text{mm}$



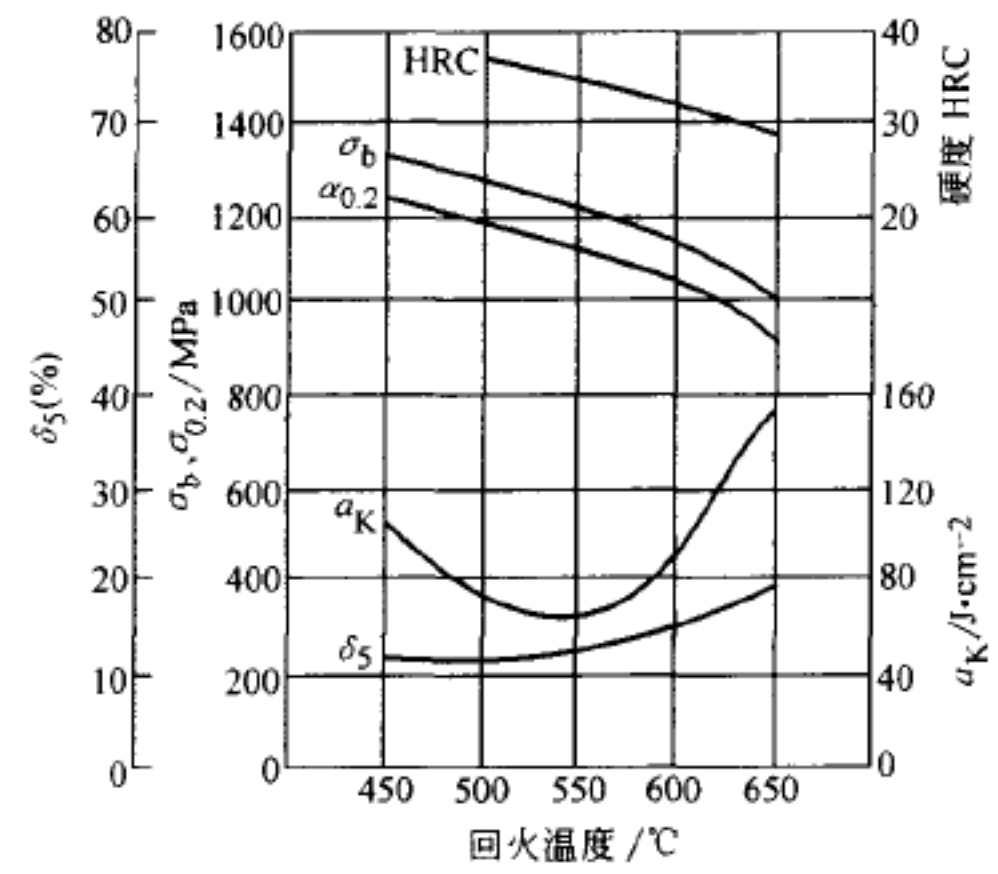
表图 5.4-21 35SiMn 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.38, Si1.32,
Mn1.30。890℃正火, 850℃油淬; 试样毛坯
尺寸: $\phi 12\text{mm}$



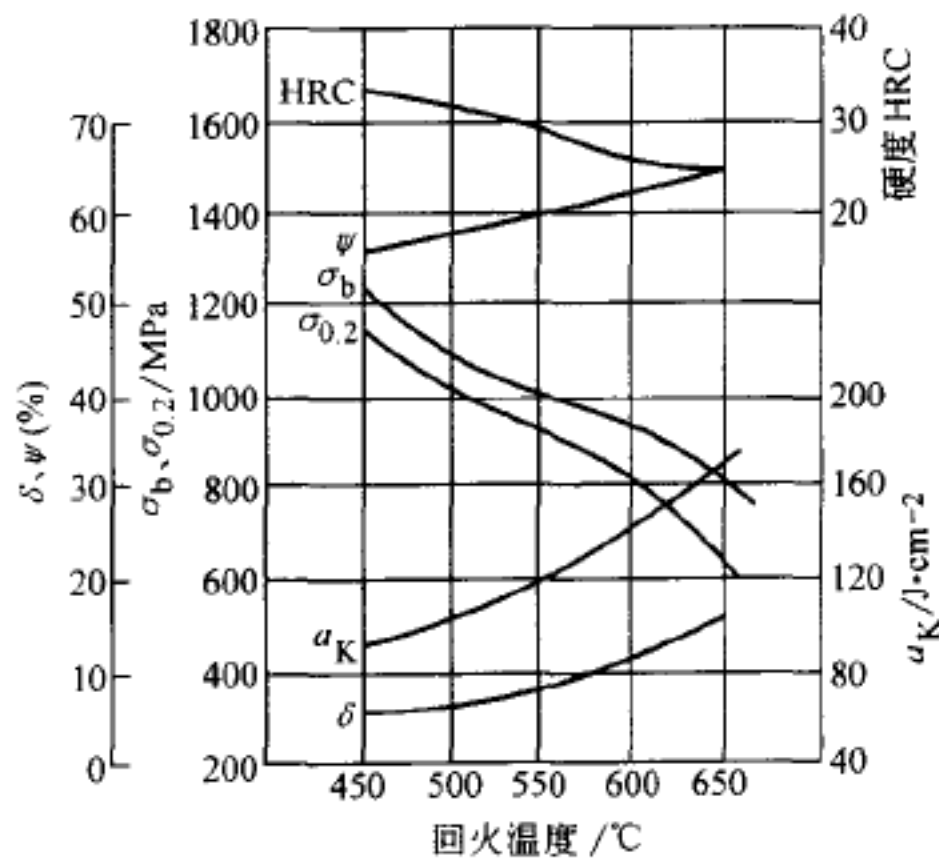
表图 5.4-22 42SiMn 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.40, Si1.34, Mn1.21, 800~900℃油淬; 试样毛坯尺寸: $\phi 60\text{mm}$



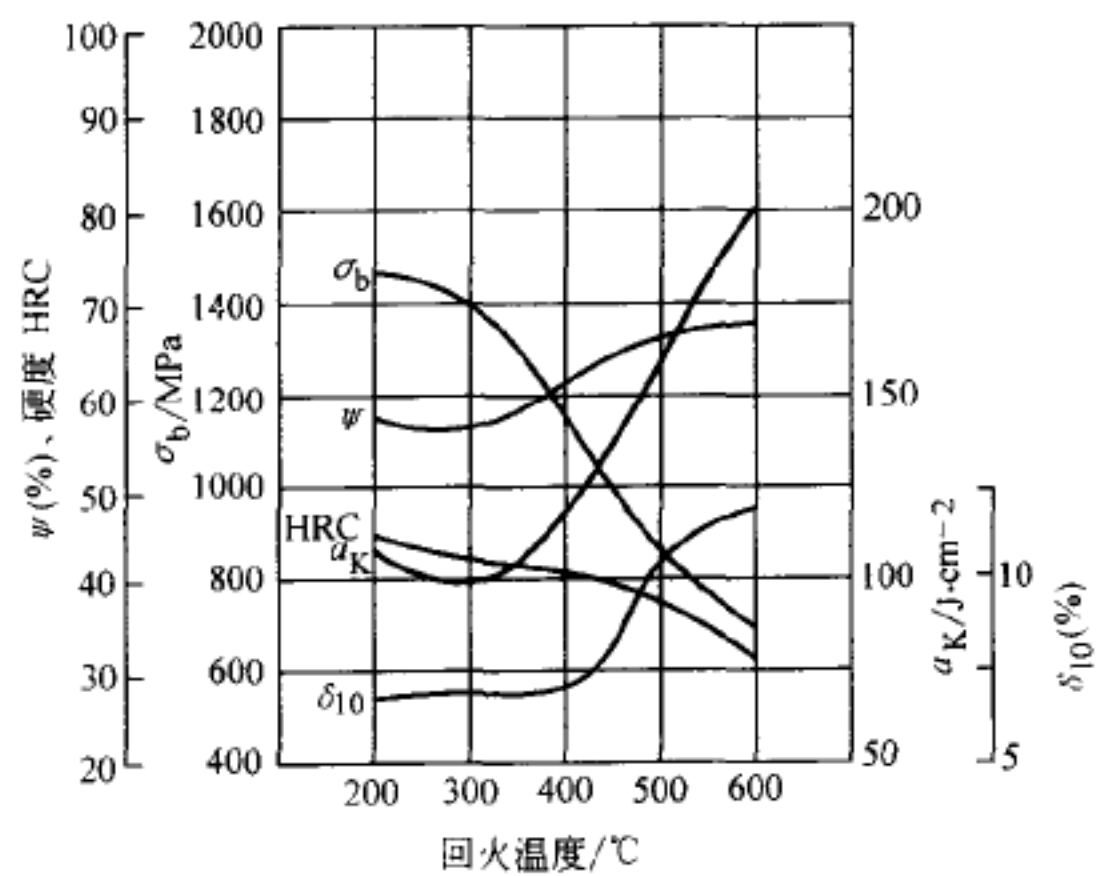
表图 5.4-23 45B 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.48, Si0.26, Mn0.61, B0.003, 840℃水淬



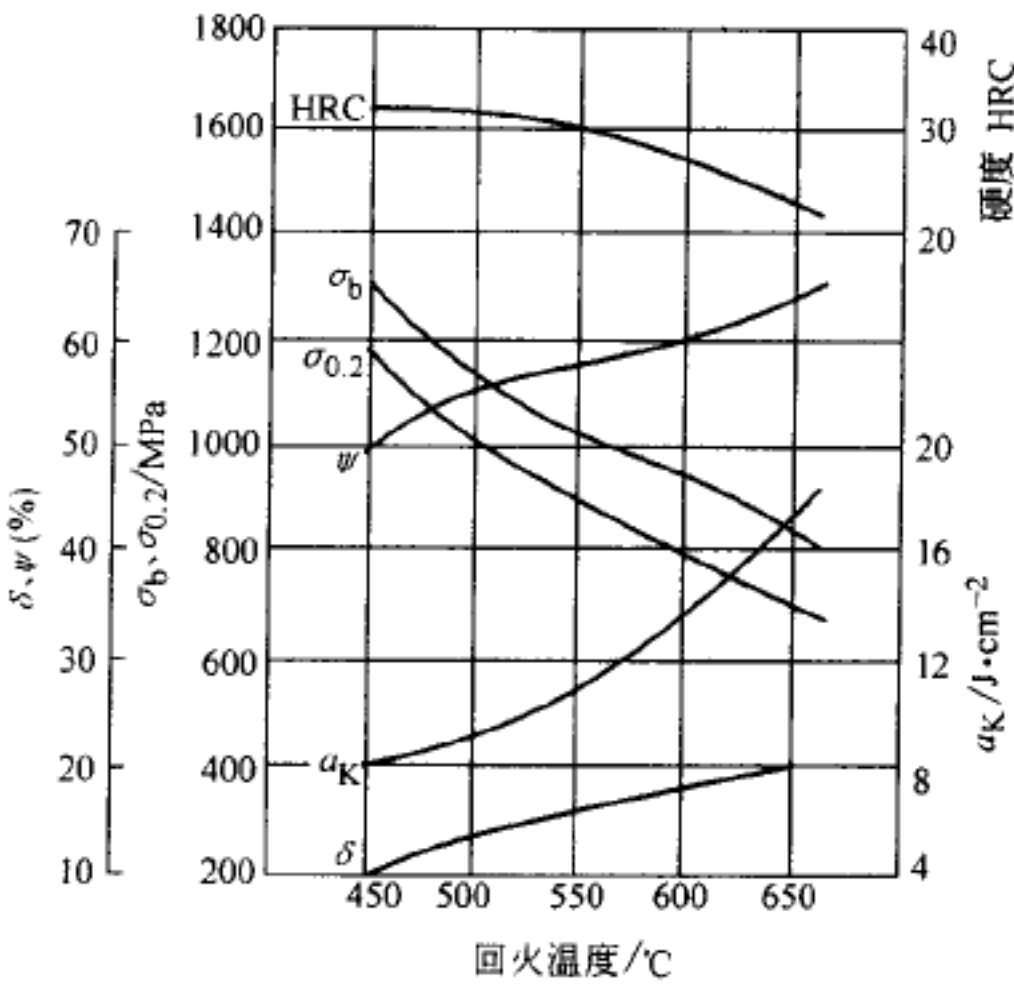
表图 5.4-24 40MnB 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.43, Si0.35, Mn1.36, B0.0023, Cr0.08, 850℃油淬

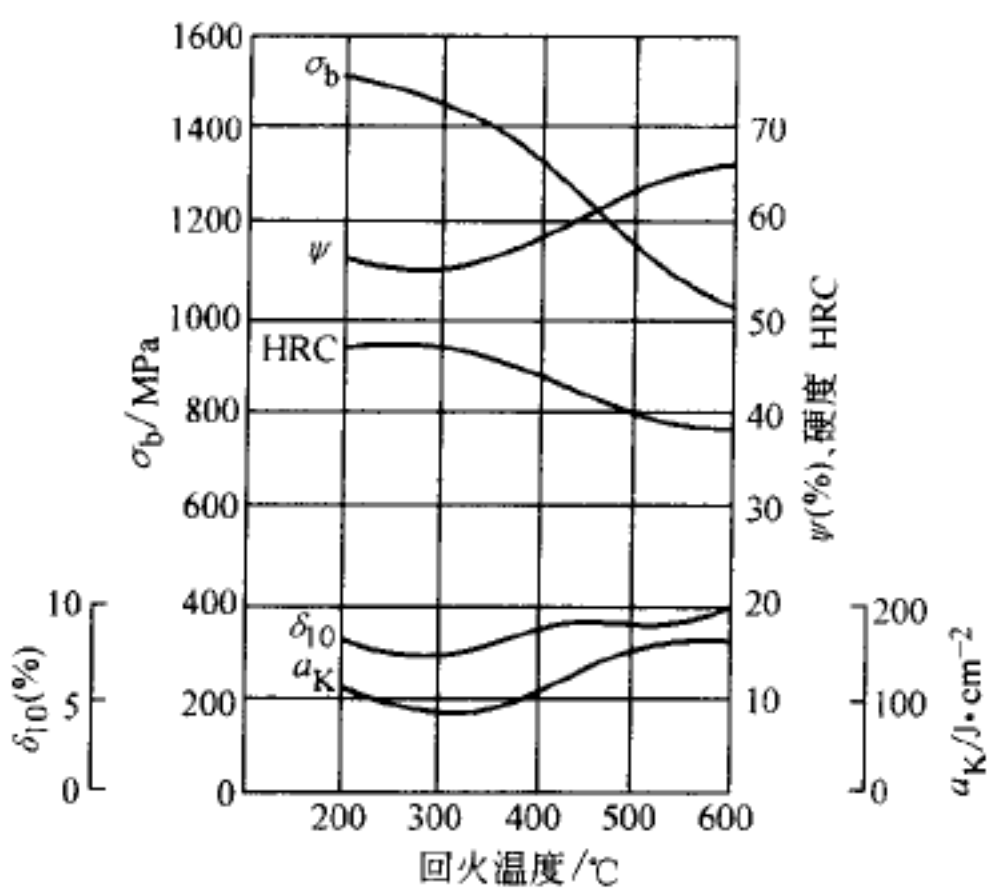


表图 5.4-25 20Mn2B 钢

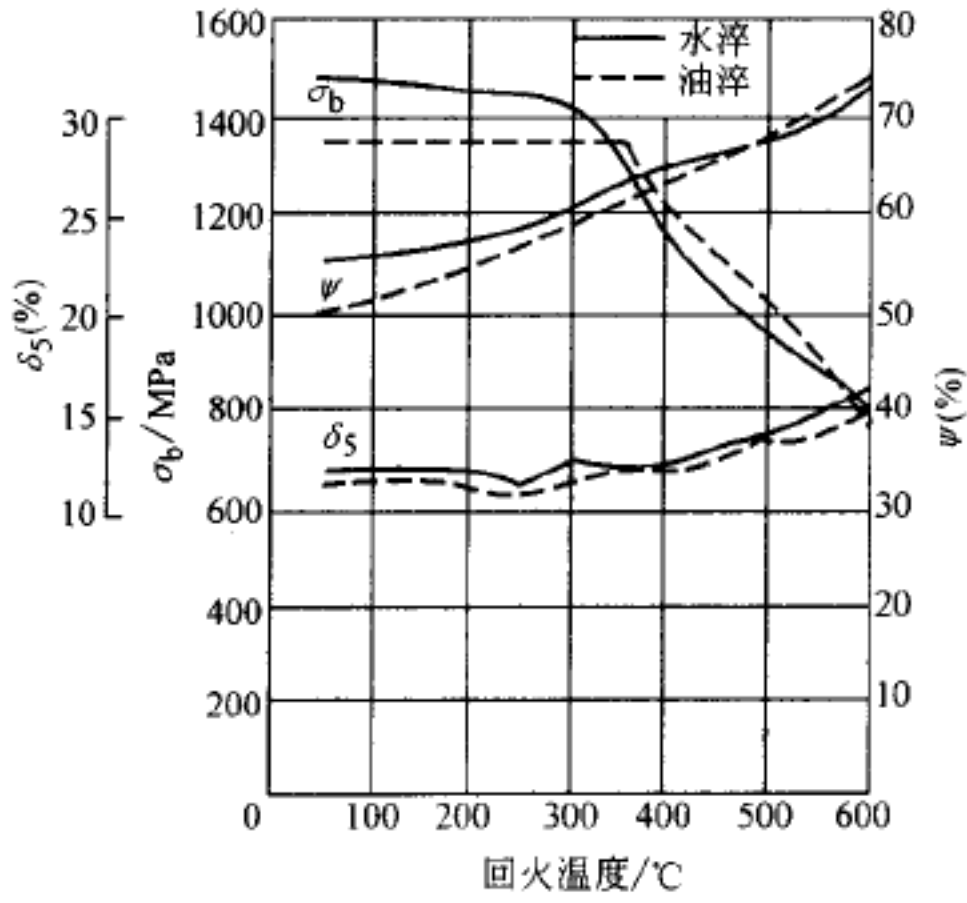
化学成分 (质量分数) (%): C0.24, Si0.29, Mn1.66, 840℃油淬



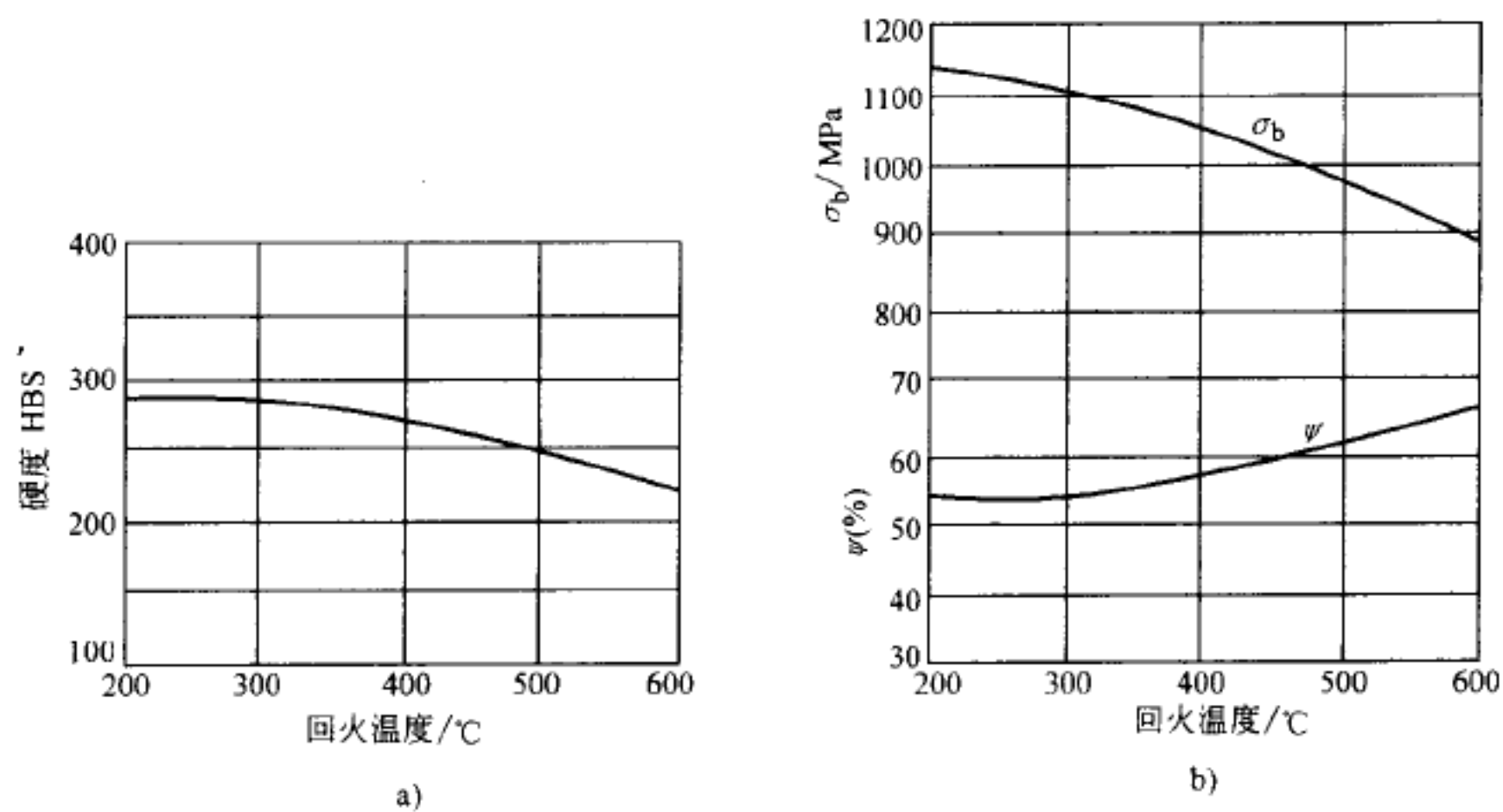
表图 5.4-26 40MnVB 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.44, Si0.28,
Mn1.24, V0.06, B0.0027。860℃油淬



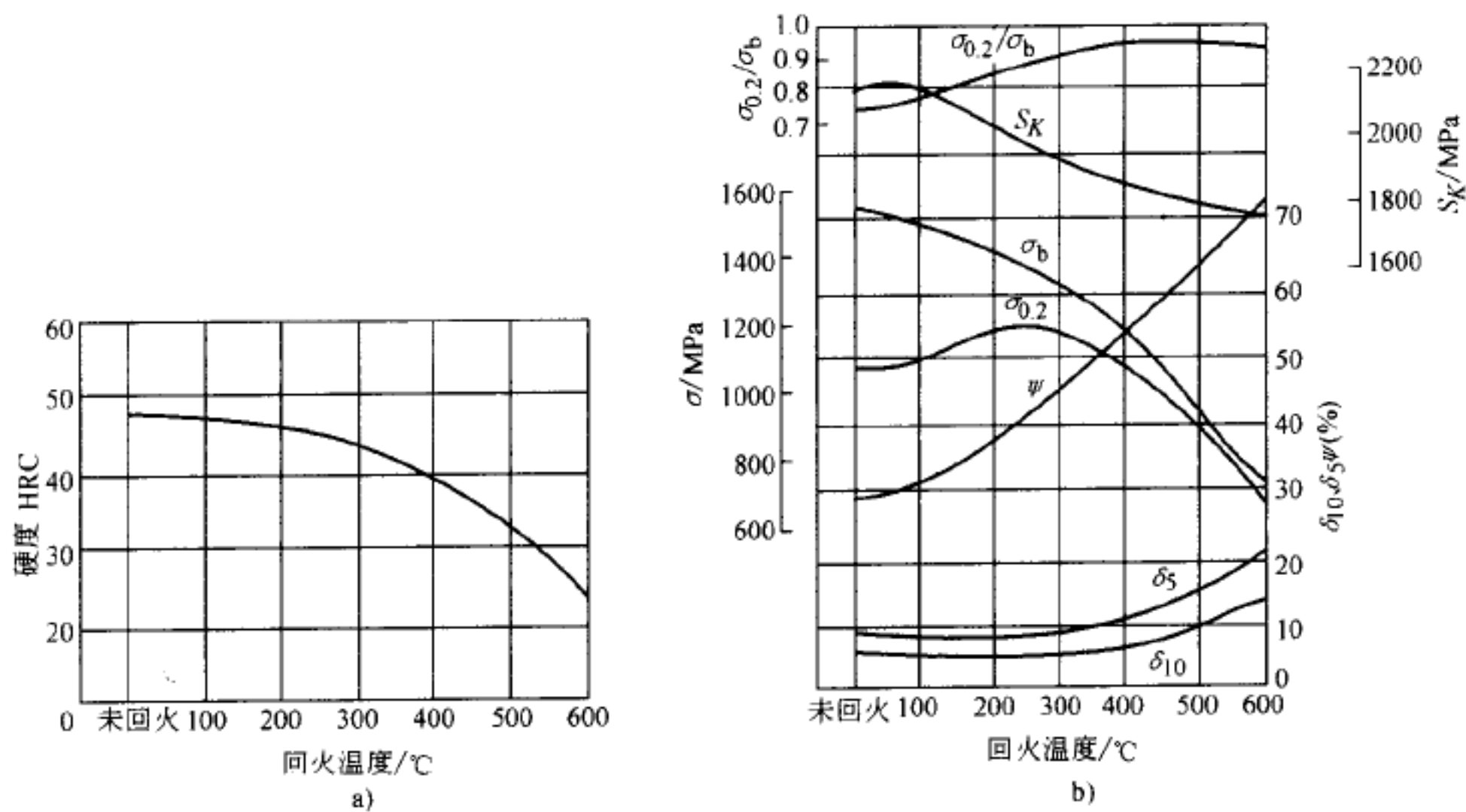
表图 5.4-27 20MnTiB 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.24, Si0.28,
Mn1.03, Cr0.35, Mo0.26, V0.008,
B。试样尺寸: $\phi 10\text{mm}$



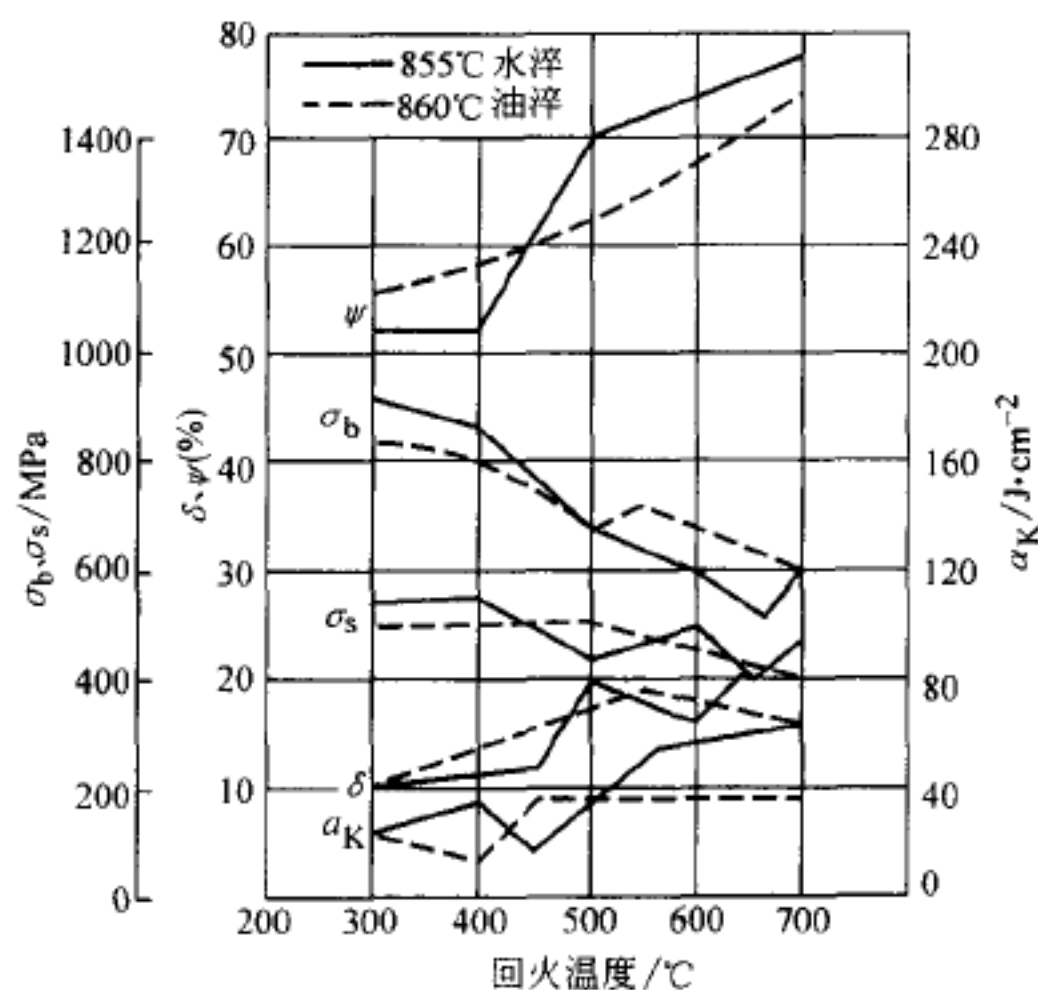
表图 5.4-28 20MnMoB 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.18, Mn1.07,
Mo0.19, B0.001。930℃正火, 890℃淬火



表图 5.4-29 15Cr 钢
试样 900℃油淬后回火, a) 硬度 b) 常规力学性能

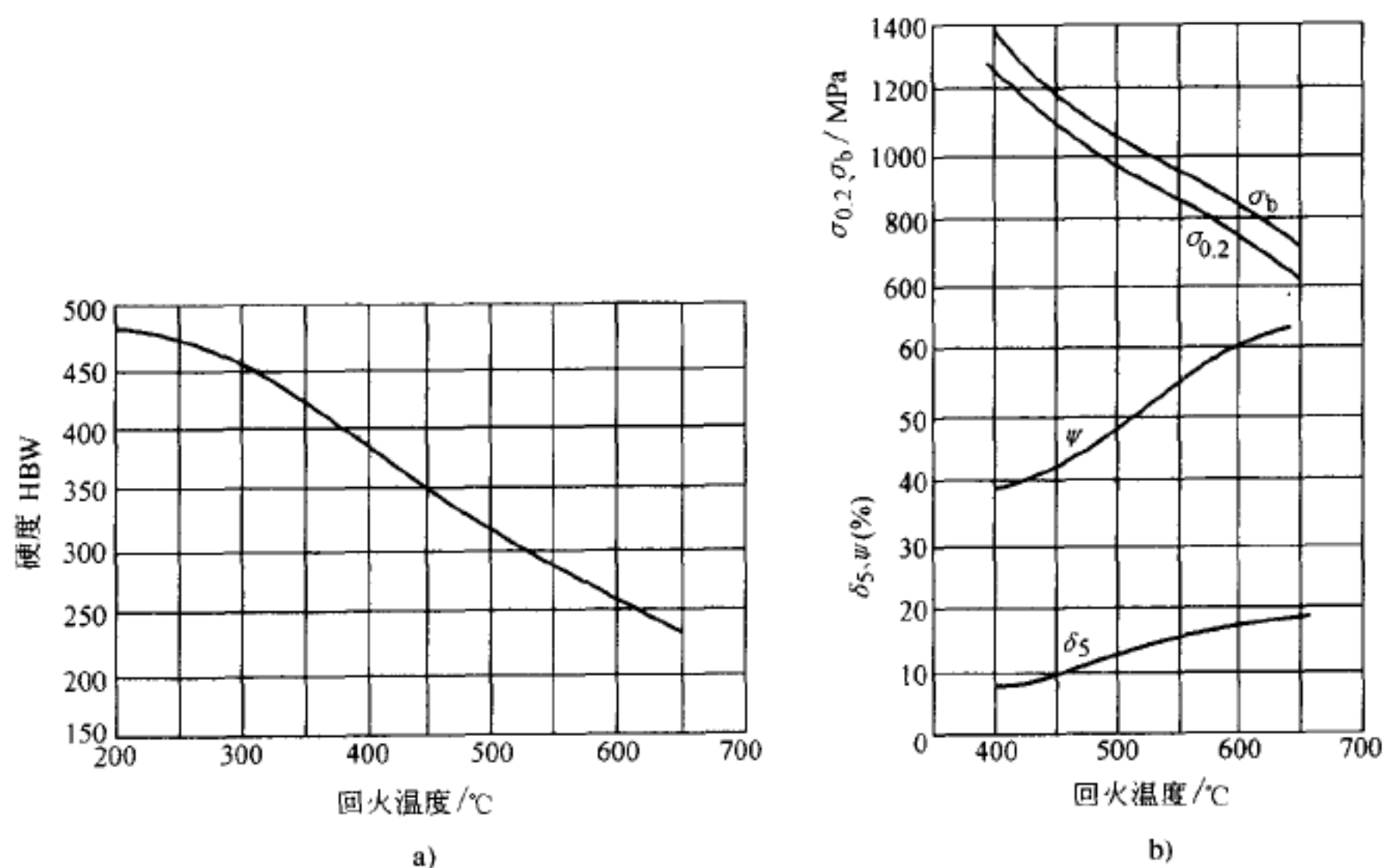


表图 5.4-30 20Cr 钢
880℃淬 w_{NaOH} 8% ~ 10% 水溶液后回火; a) 硬度 b) 常规力学性能



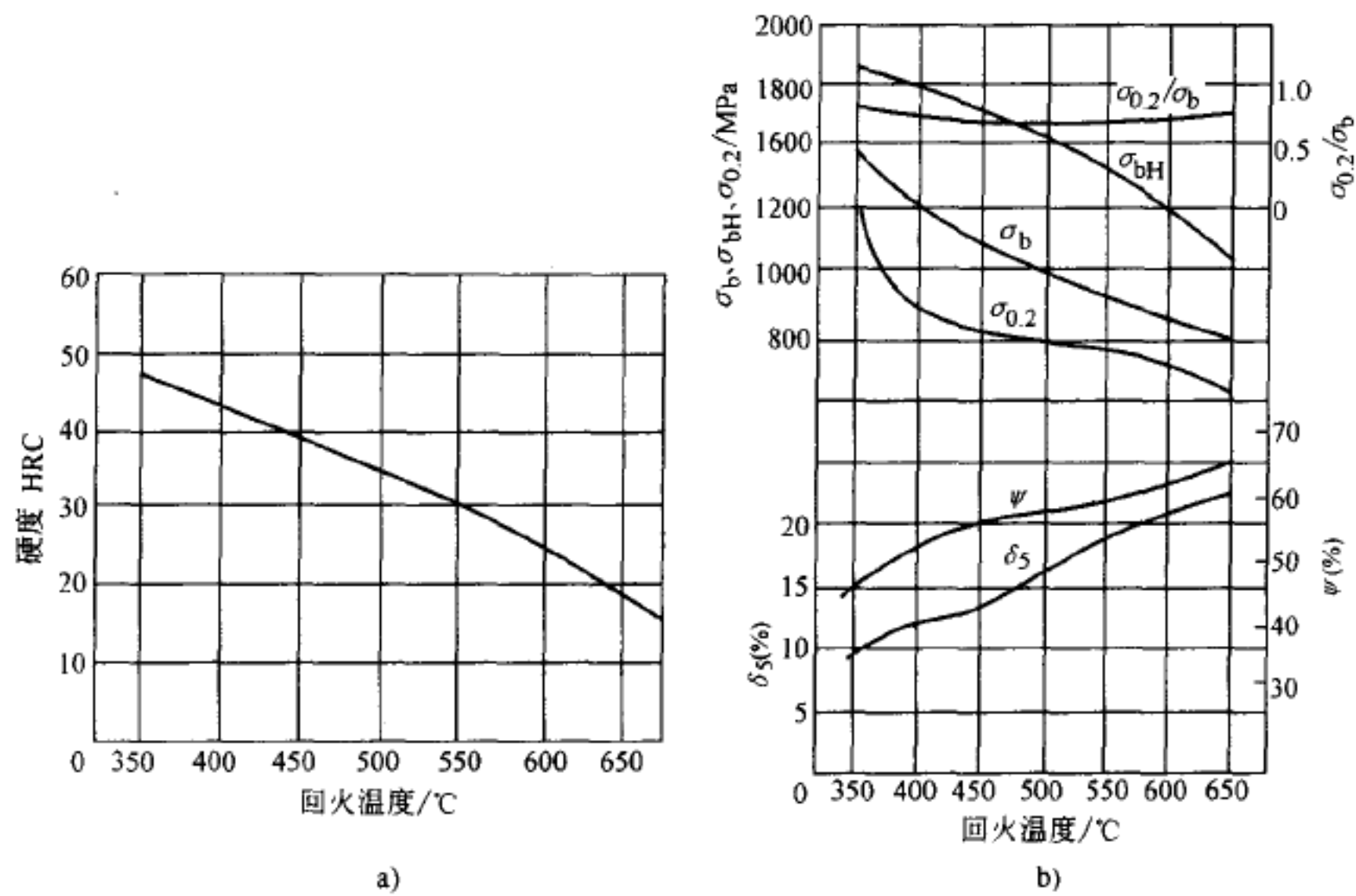
表图 5.4-31 30Cr 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.31, Cr0.86,
855 ~ 860°C 淬火 (水、油); 冲击试样: 横向

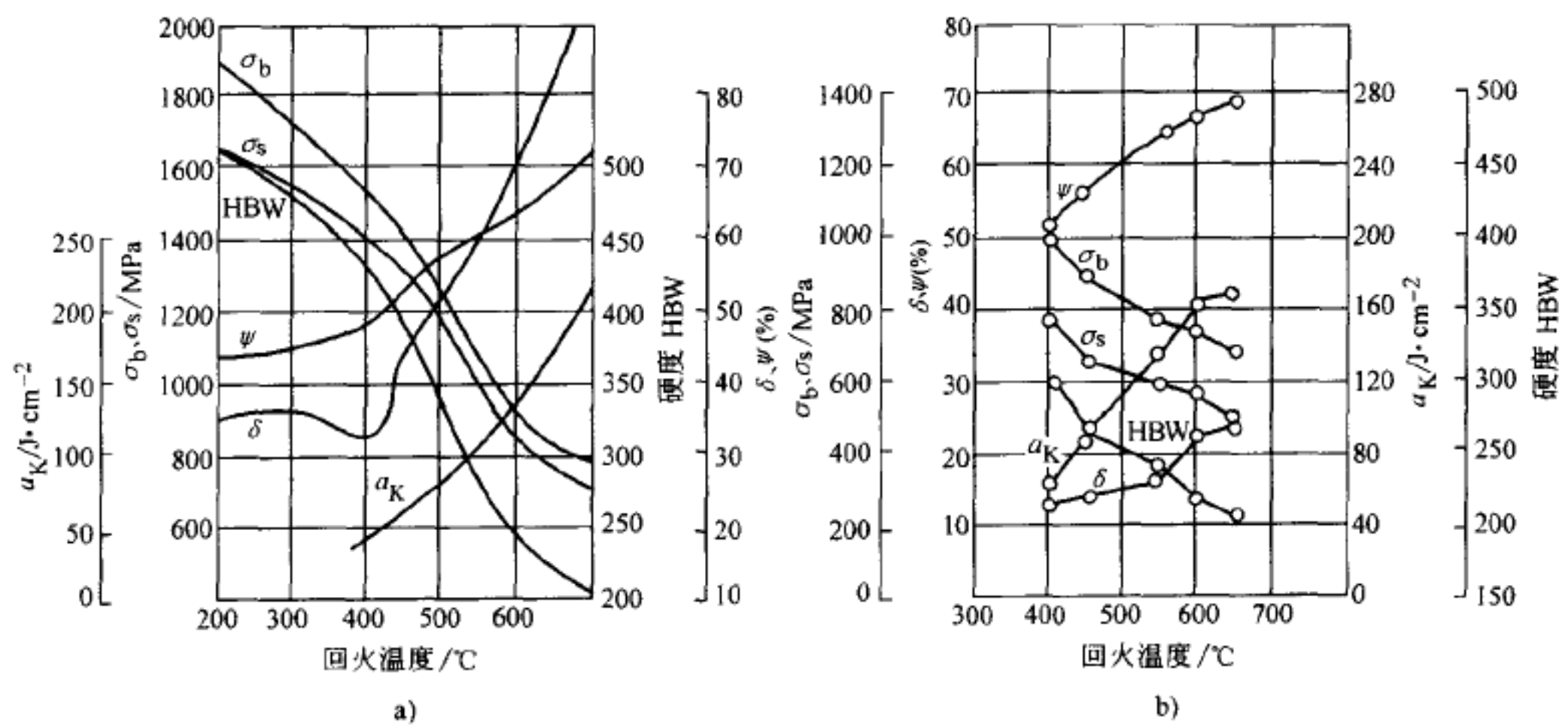


表图 5.4-32 38CrA 钢

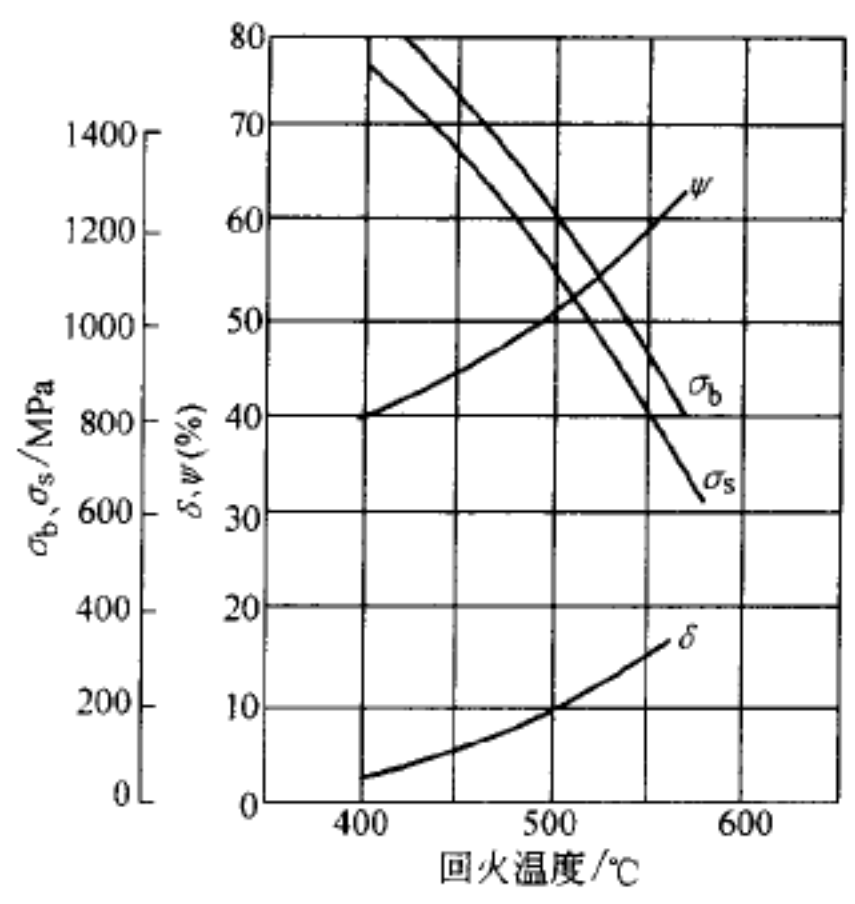
850°C 水淬, a) 硬度 b) 常规力学性能



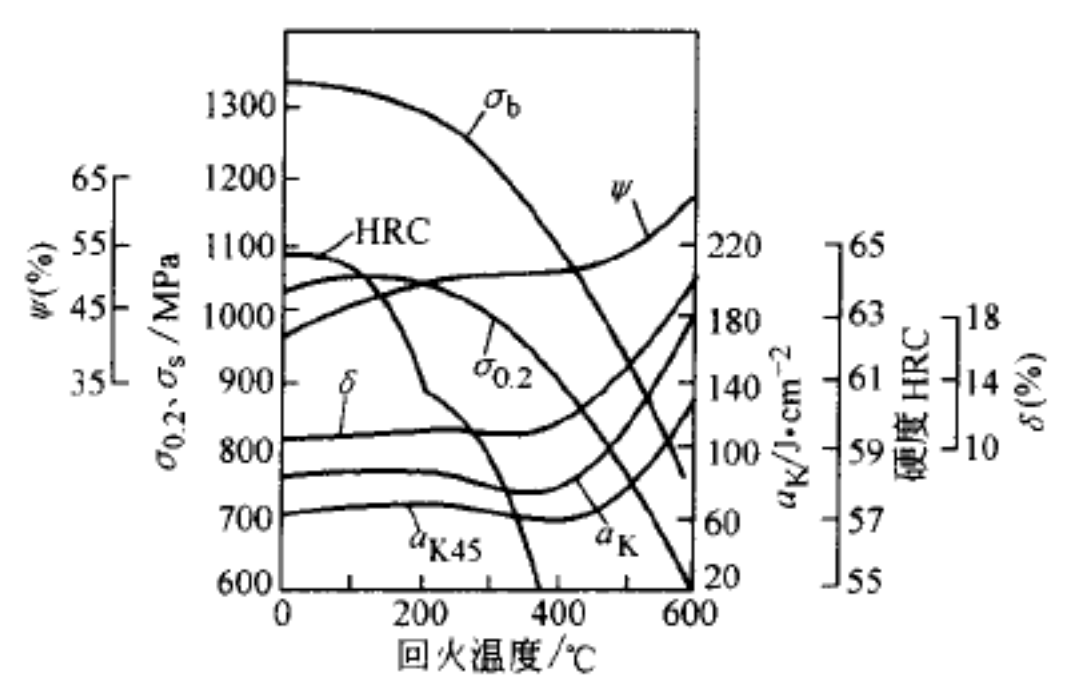
表图 5.4-33 40CrA 钢
840℃油淬; a) 硬度 b) 常规力学性能



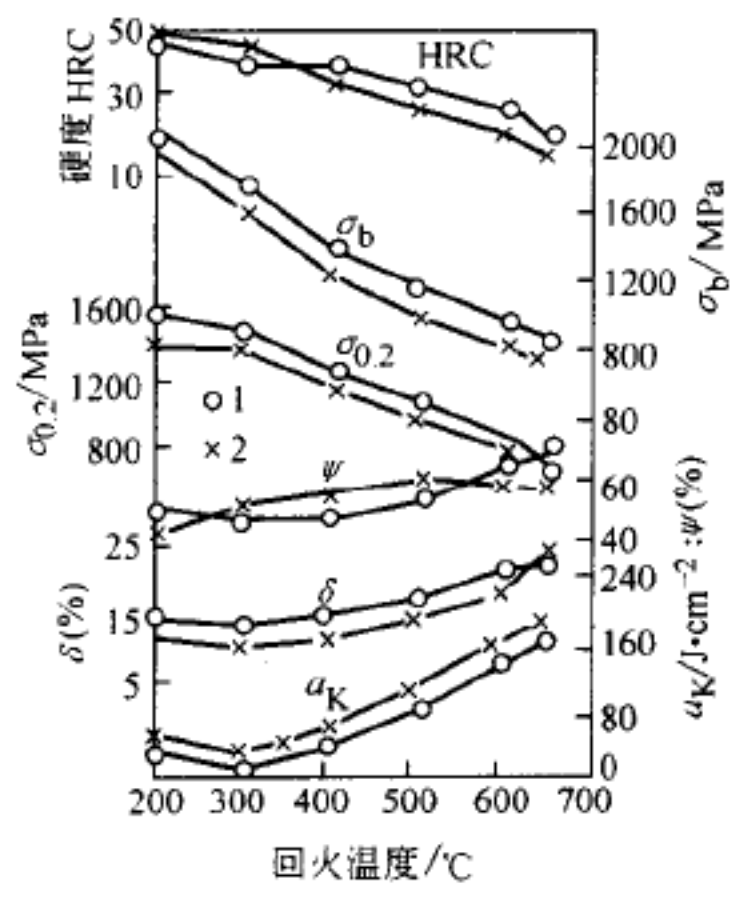
表图 5.4-34 40Cr 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.40 ~ 0.39, Mn0.66, Cr0.97 ~ 1.01; 热处理: 850℃油淬,
840℃油淬; 试样毛坯尺寸: $\phi 12\text{mm} \sim \phi 25\text{mm}$



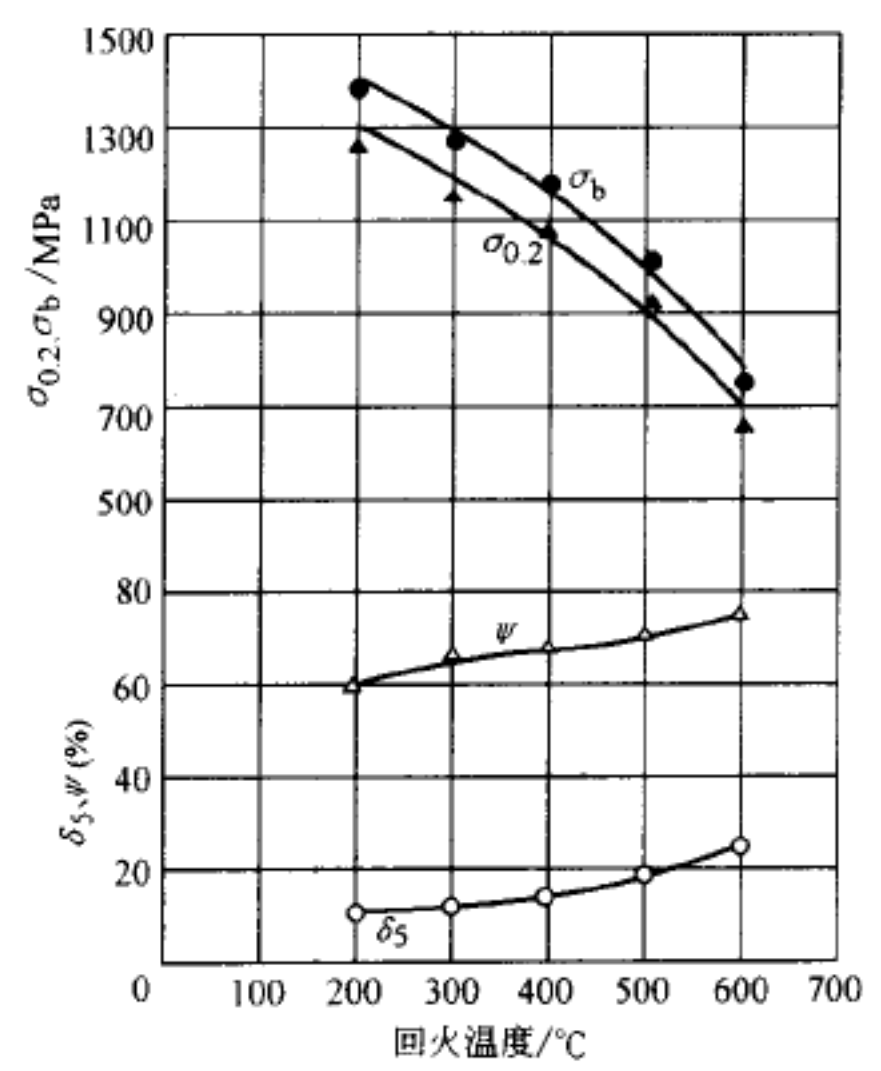
表图 5.4-35 50Cr 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.47, Mn0.27, Cr1.25; 820℃油淬



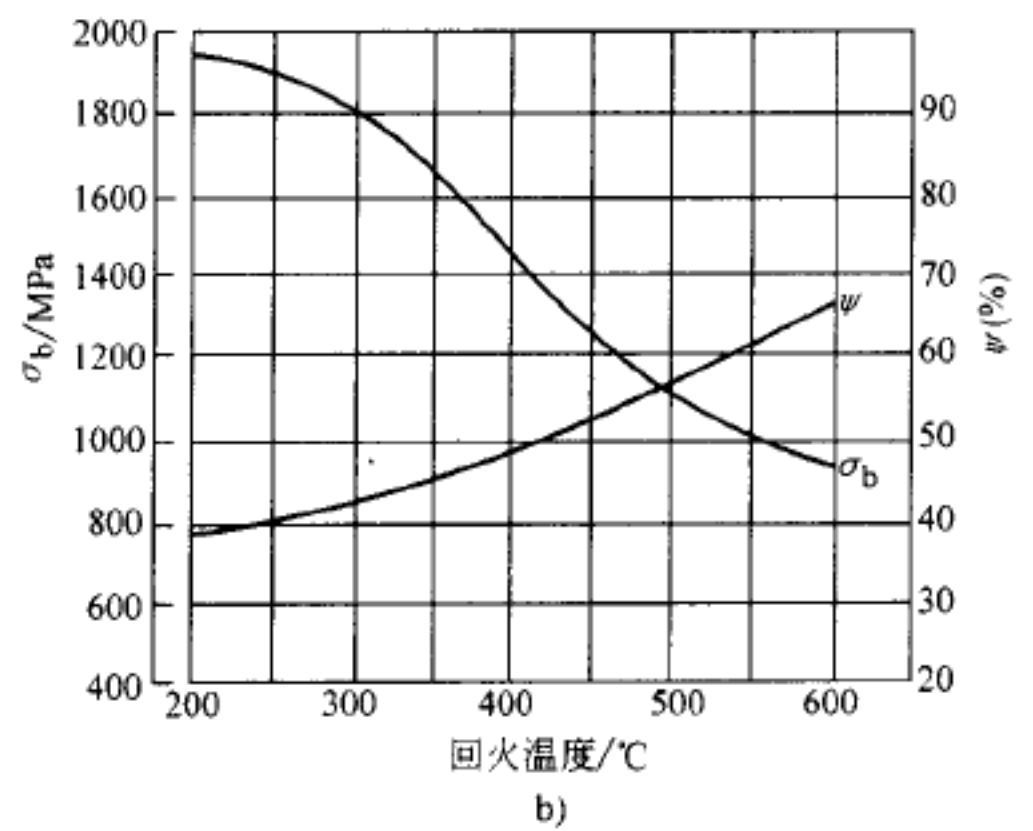
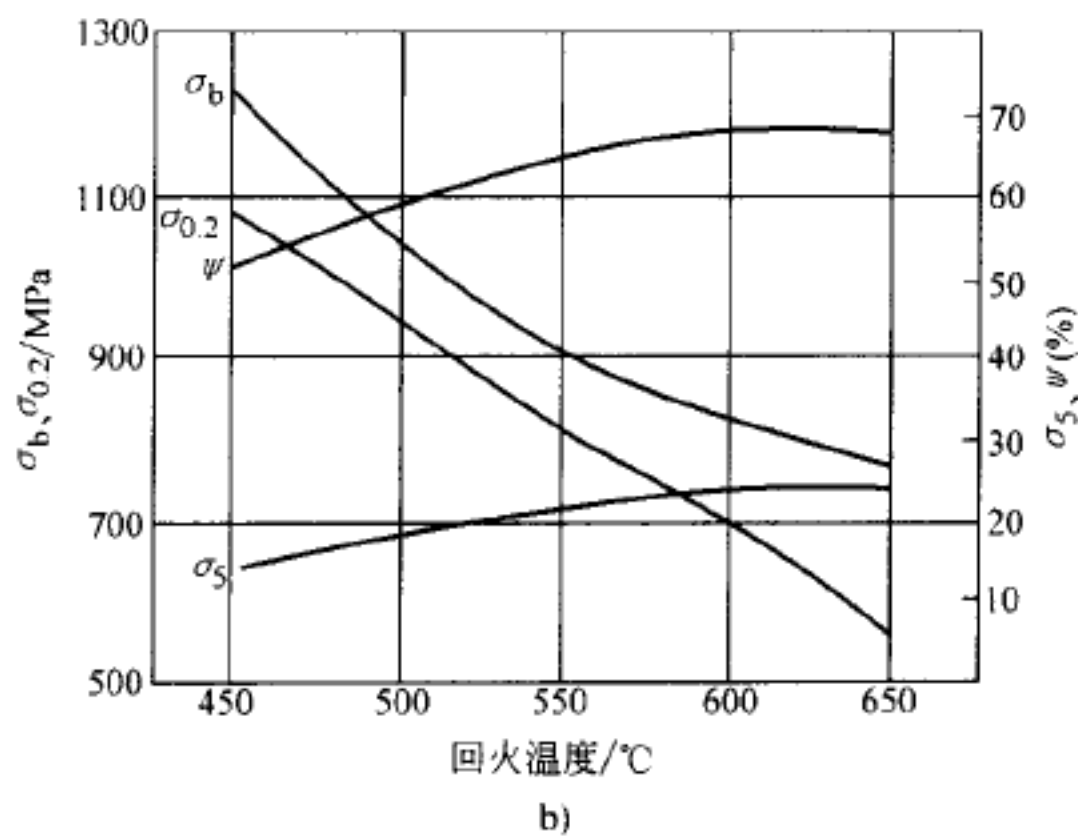
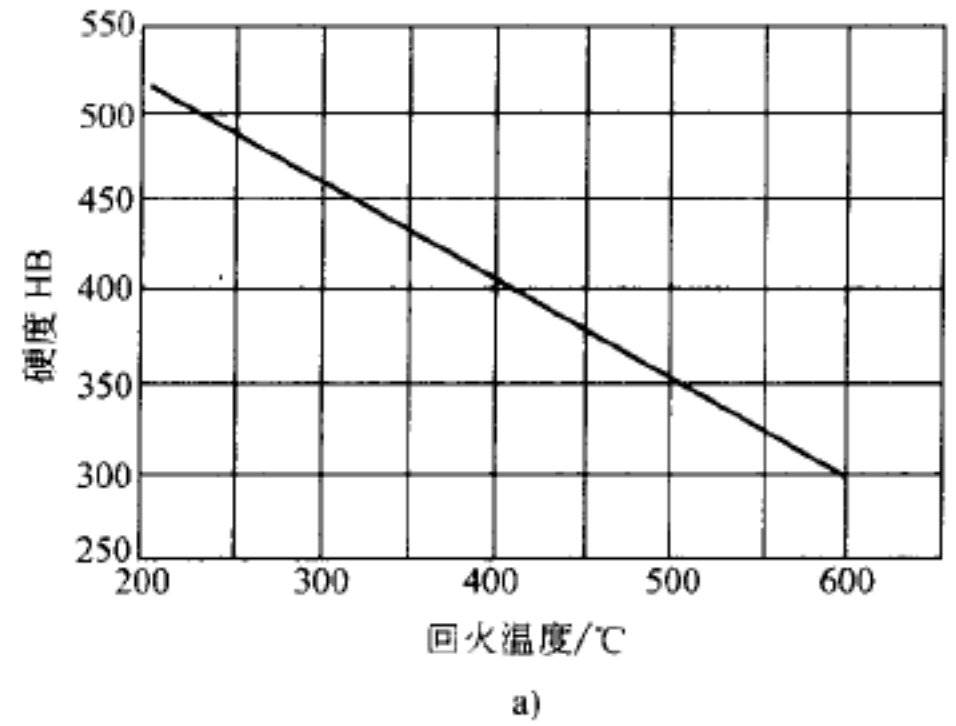
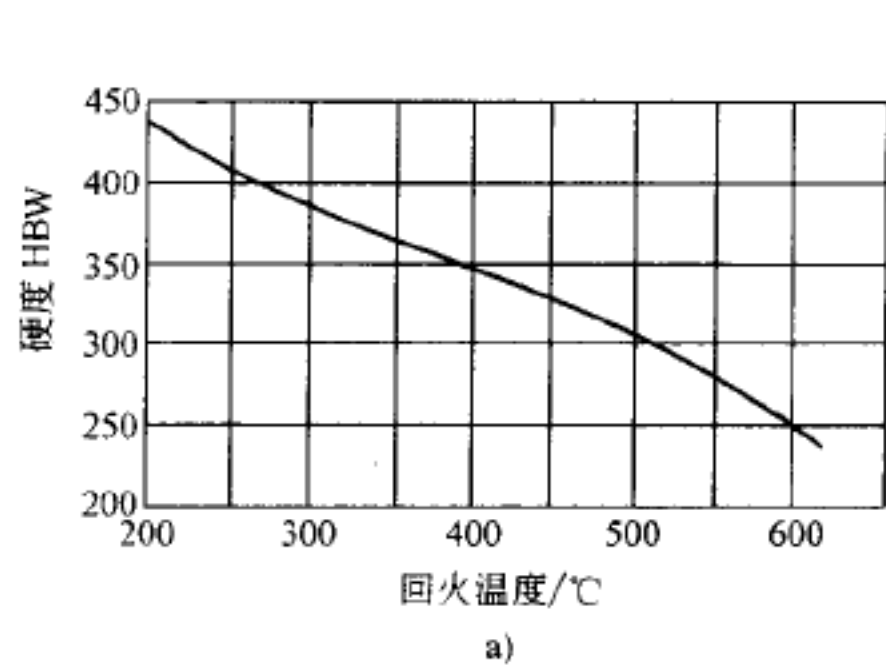
表图 5.4-36 20CrNi 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.16, Mn0.90, Si≤0.35, Cr0.90, Ni1.00;
850℃油淬, 试样尺寸: $\phi 10$ mm



表图 5.4-37 40CrNi 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.37 (0.41), Mn0.66 (0.60), Si0.30 (0.25), Cr0.97 (0.85), Ni1.08 (1.16); 820℃油淬

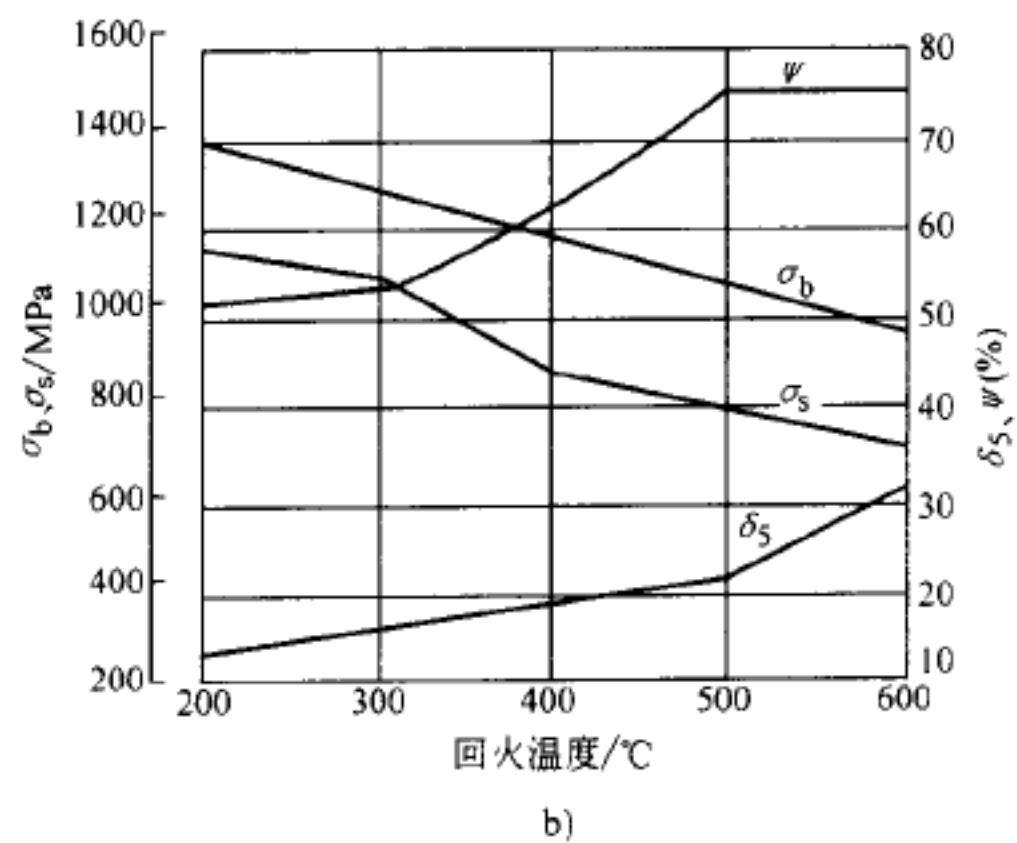
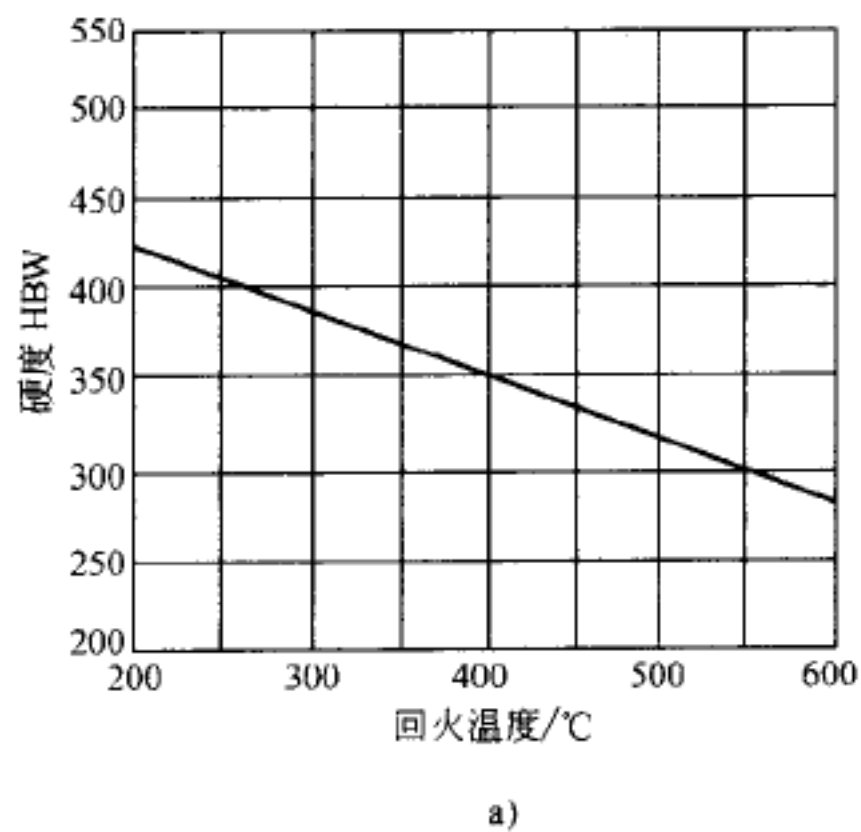


表图 5.4-38 12CrNi3 钢
800℃油淬

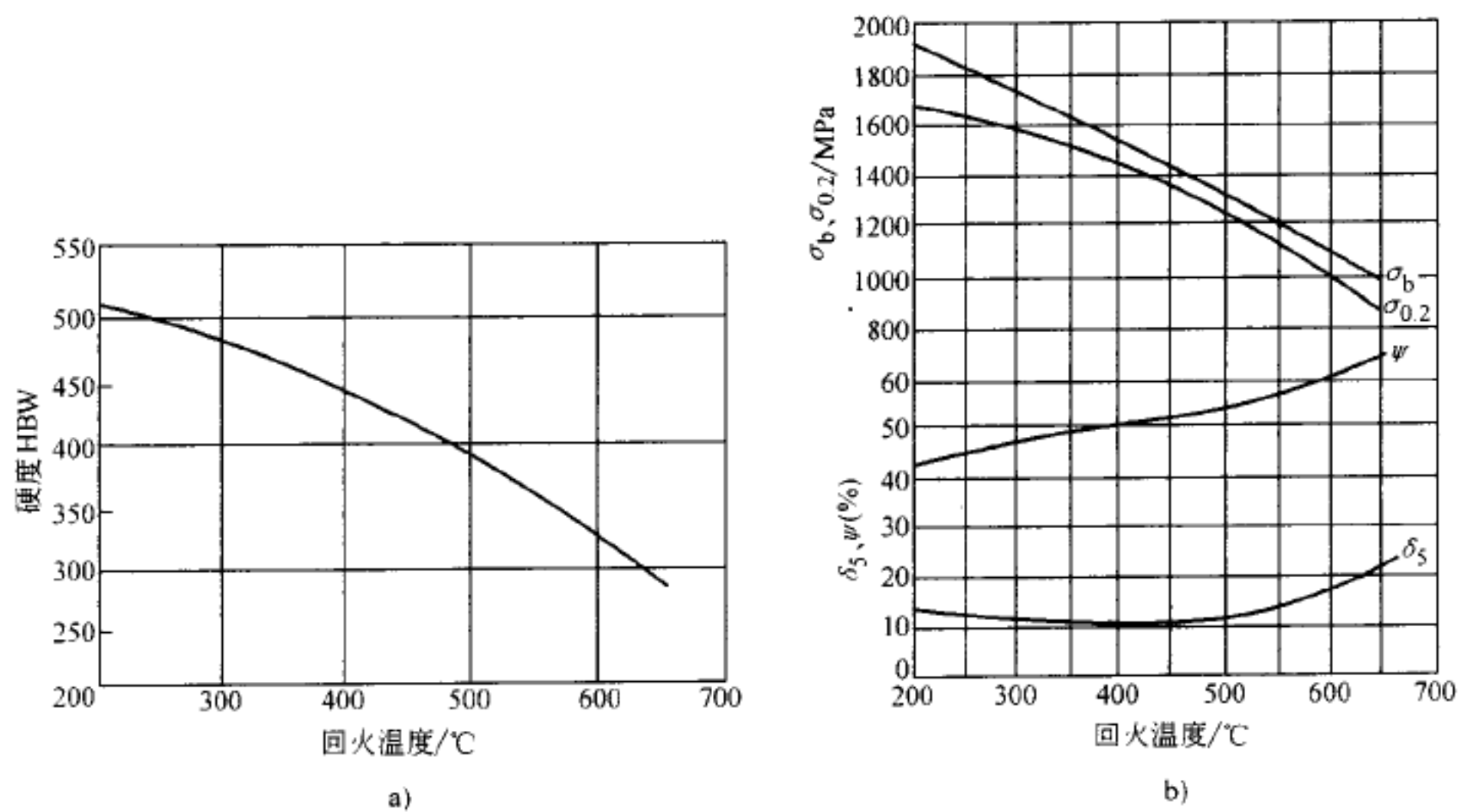


表图 5.4-39 20CrNi3A 钢
830℃油淬, a) 硬度 b) 常规力学性能

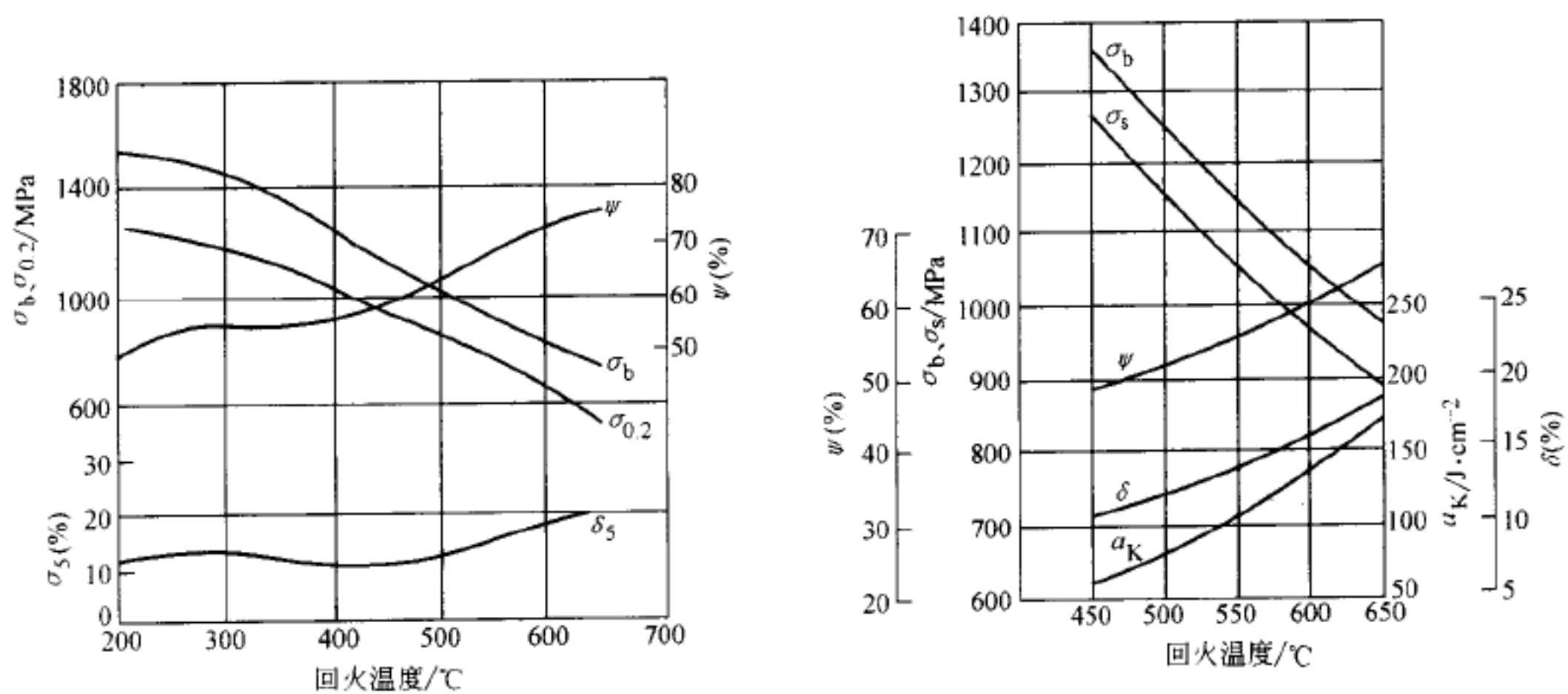
表图 5.4-40 37CrNi3A 钢
840℃油淬, a) 硬度 b) 常规力学性能



表图 5.4-41 12CrNi4A 钢
770℃油淬, a) 硬度 b) 常规力学性能

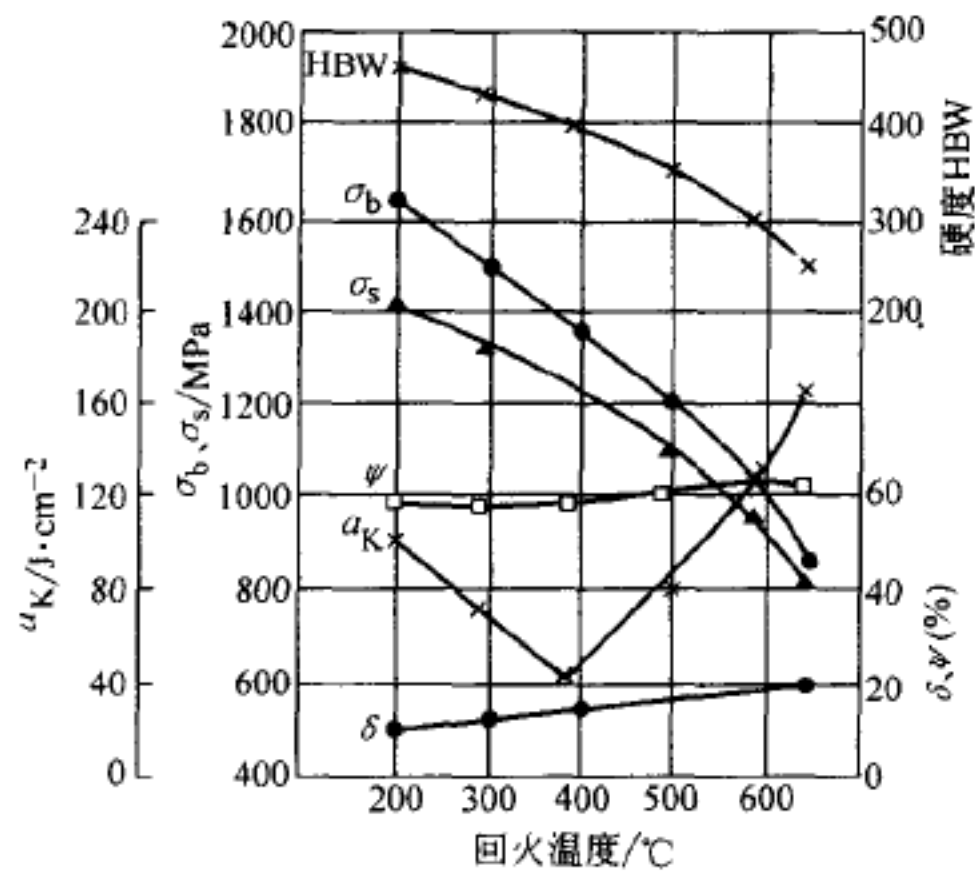


表图 5.4-42 40CrNiMoA 钢
850℃油淬, a) 硬度 b) 常规力学性能

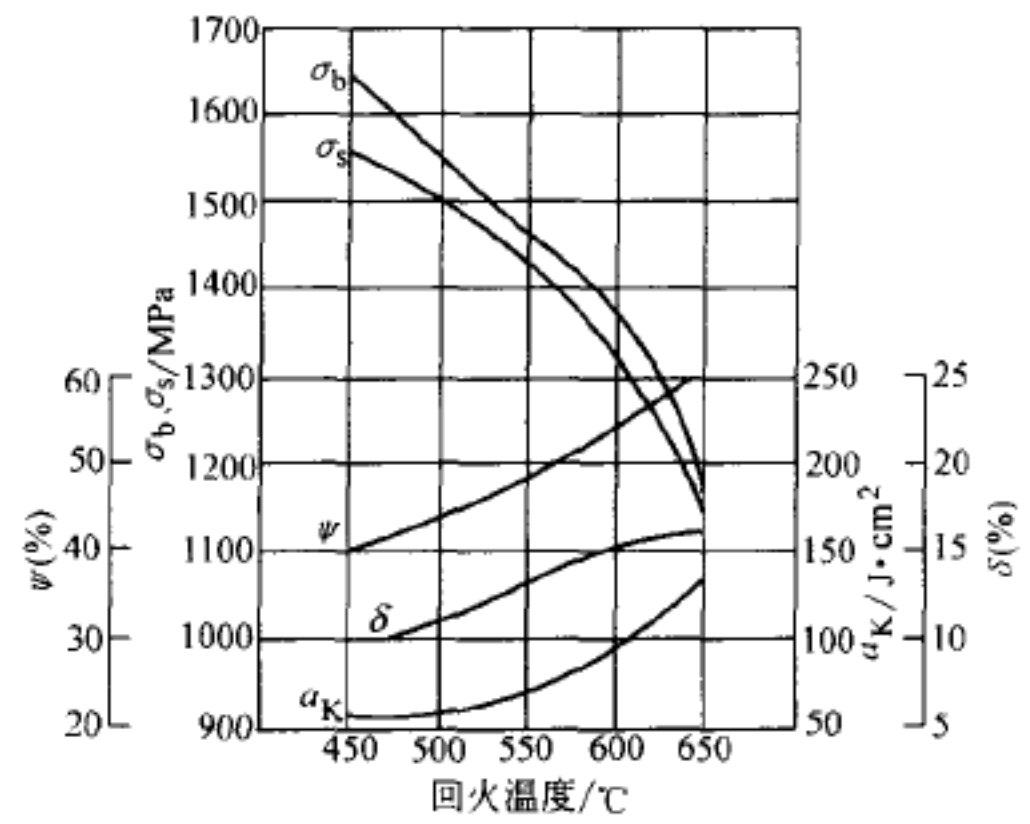


表图 5.4-43 30CrMoA 钢
880℃油淬

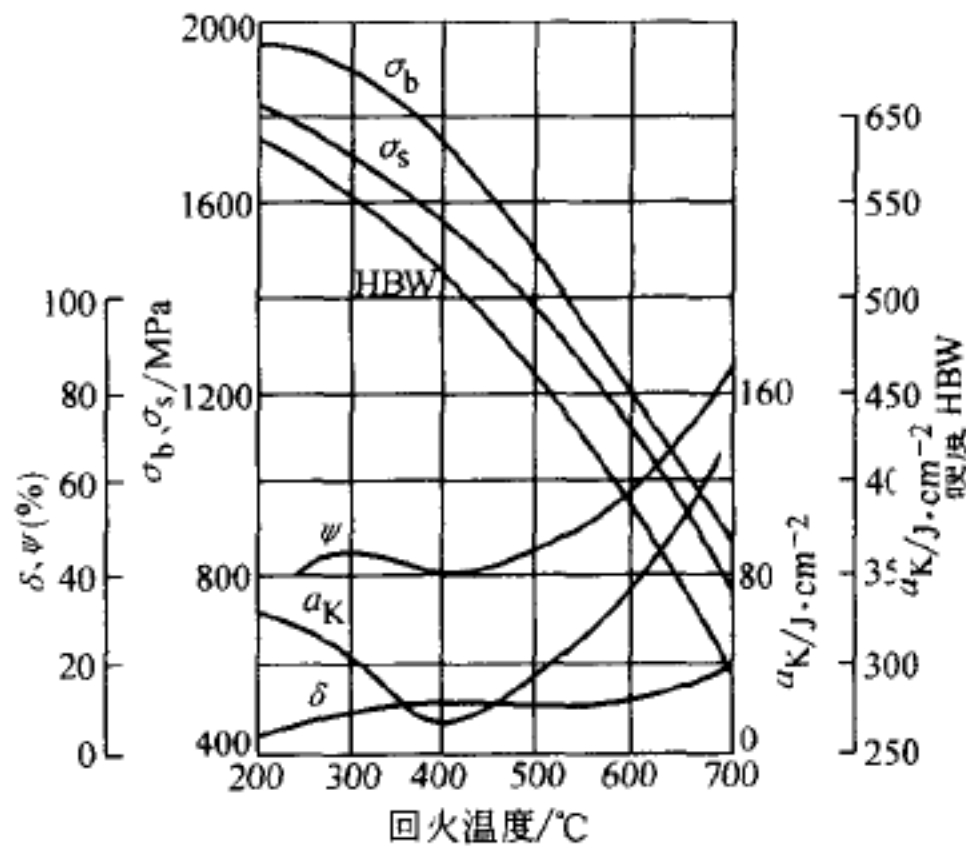
表图 5.4-44 42CrMo 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.39, Si0.21, Mn0.59, Cr1.00, Mo0.20; 840℃油淬



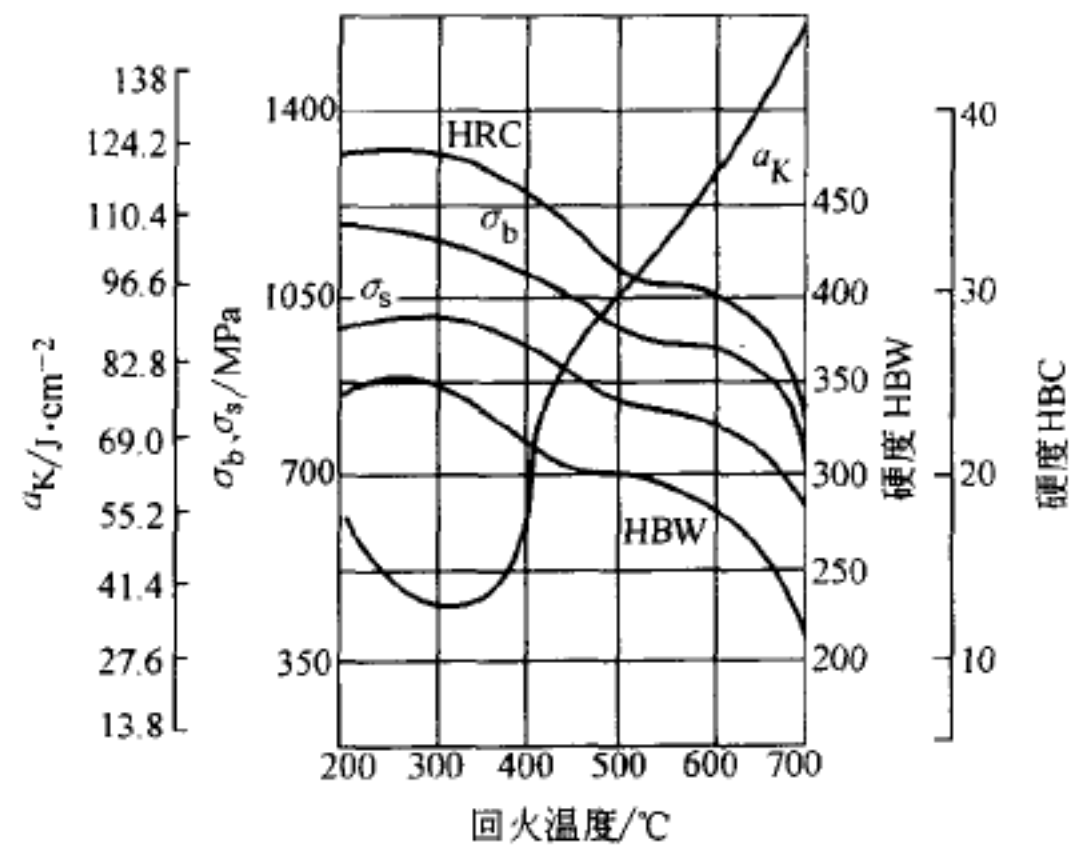
表图 5.4-45 35CrMoV 钢
850℃水淬



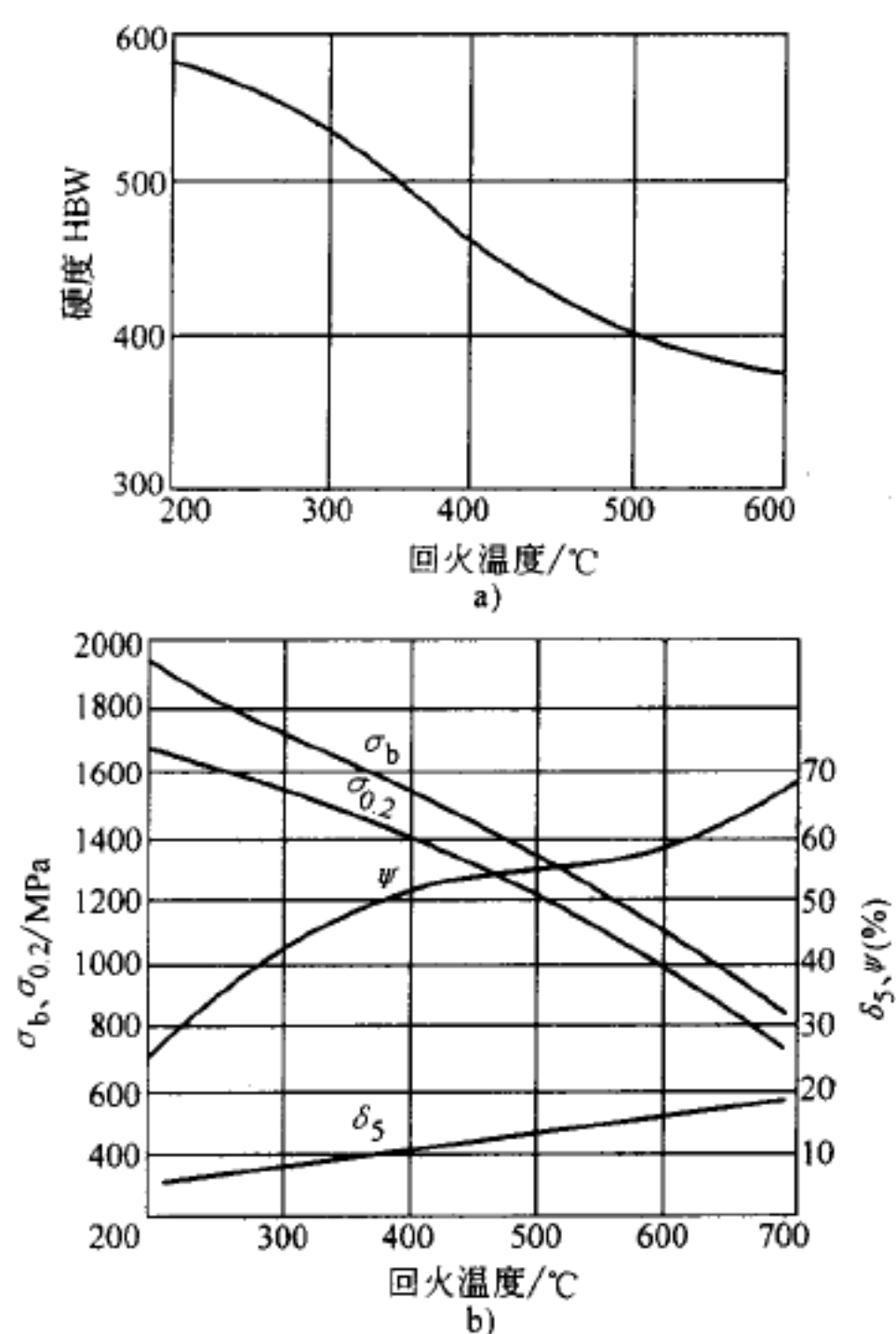
表图 5.4-46 40Cr2MoV 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.43, Si0.21,
Mn0.62, Cr1.78, Mo0.35, V0.22; 850℃油淬



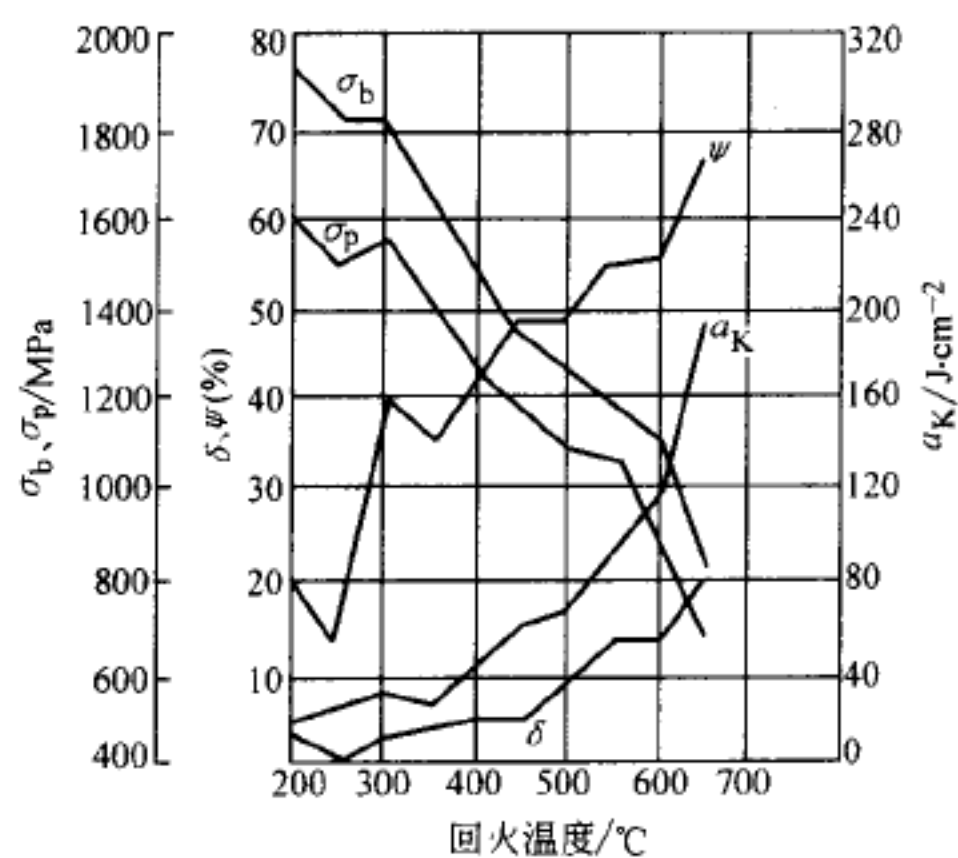
表图 5.4-47 38CrMoAl 钢
950℃油淬



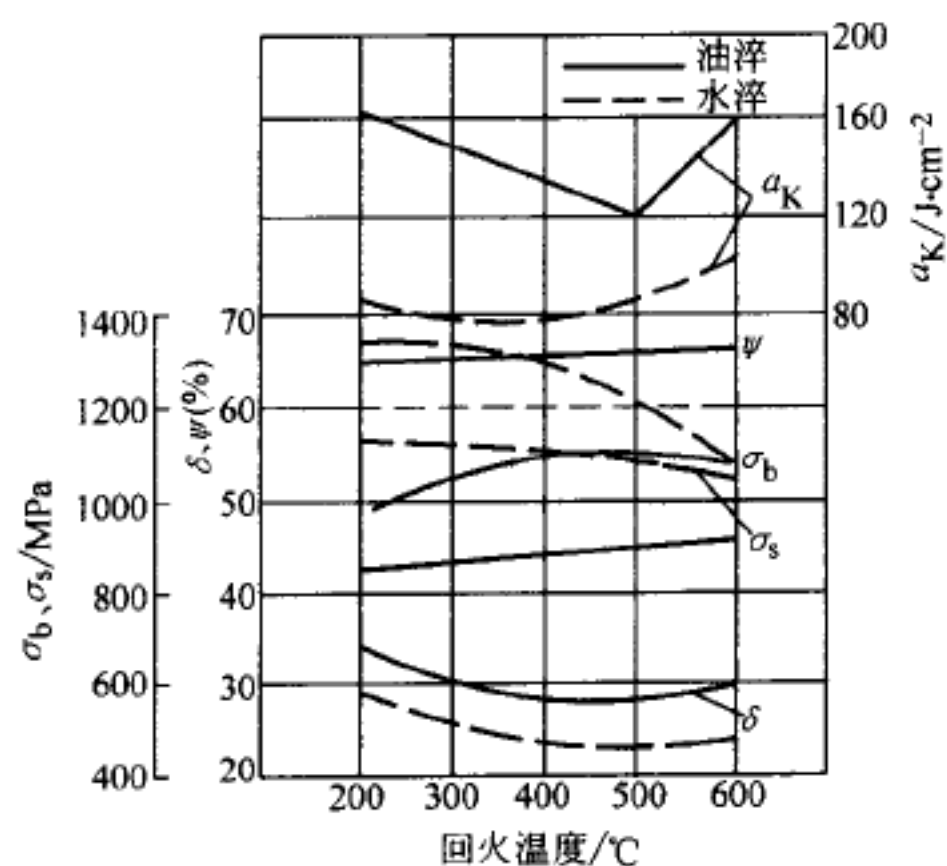
表图 5.4-48 20CrV 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.23, Mn0.75,
Cr0.96, V0.17; 850℃水淬, 试样毛坯尺
寸: $\phi 25\text{mm}$, 艾氏冲击试样



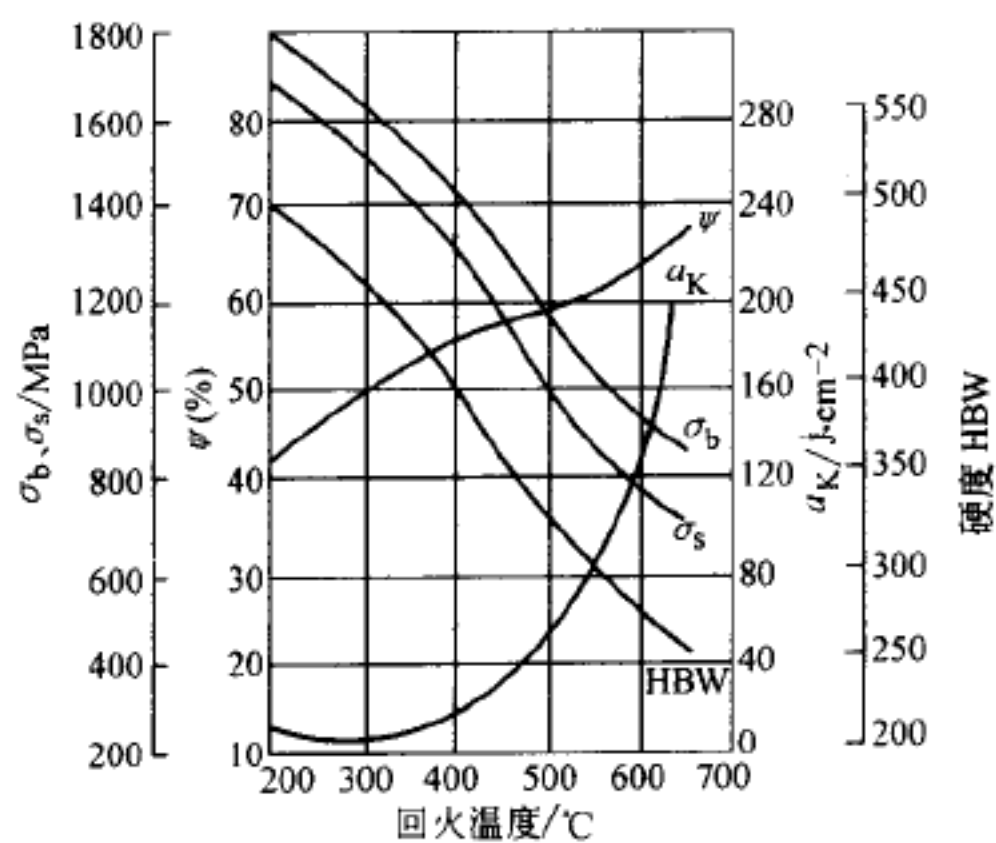
表图 5.4-49 40CrVA 钢
880°C 油淬, a) 硬度 b) 力学性能



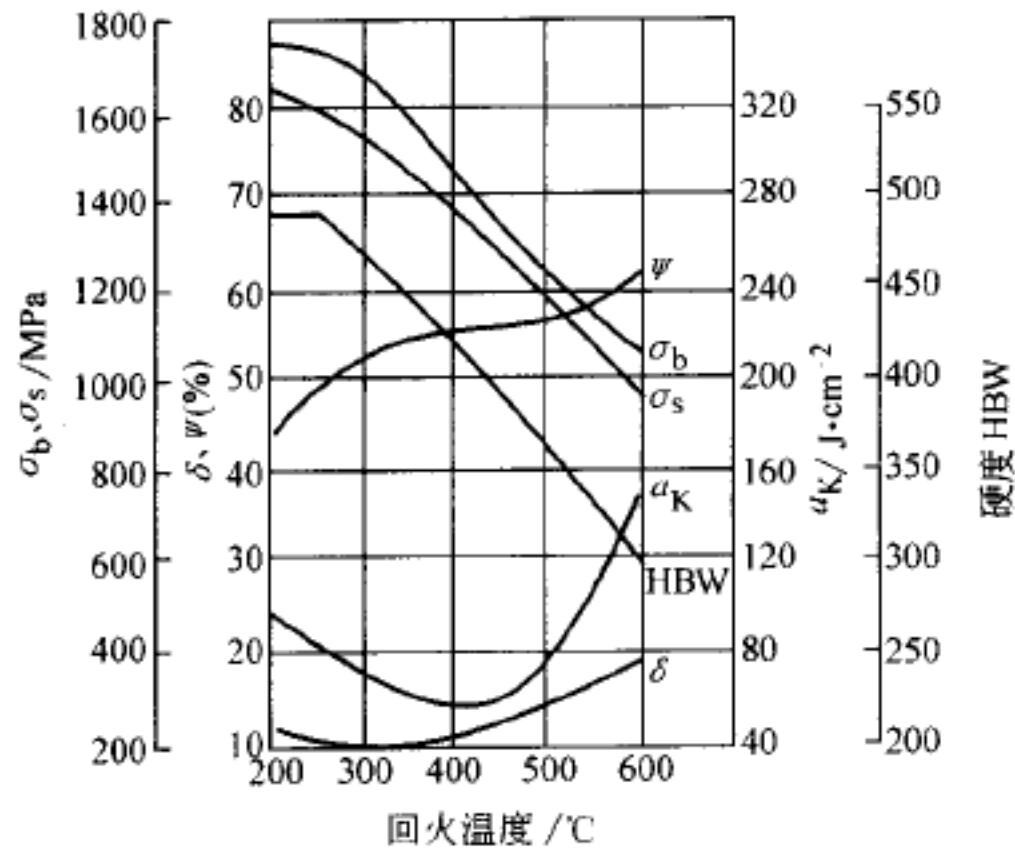
表图 5.4-50 45CrV 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.45, Si0.37, Mn0.66, Cr1.02, Ni0.14, V0.24; 860°C 油淬



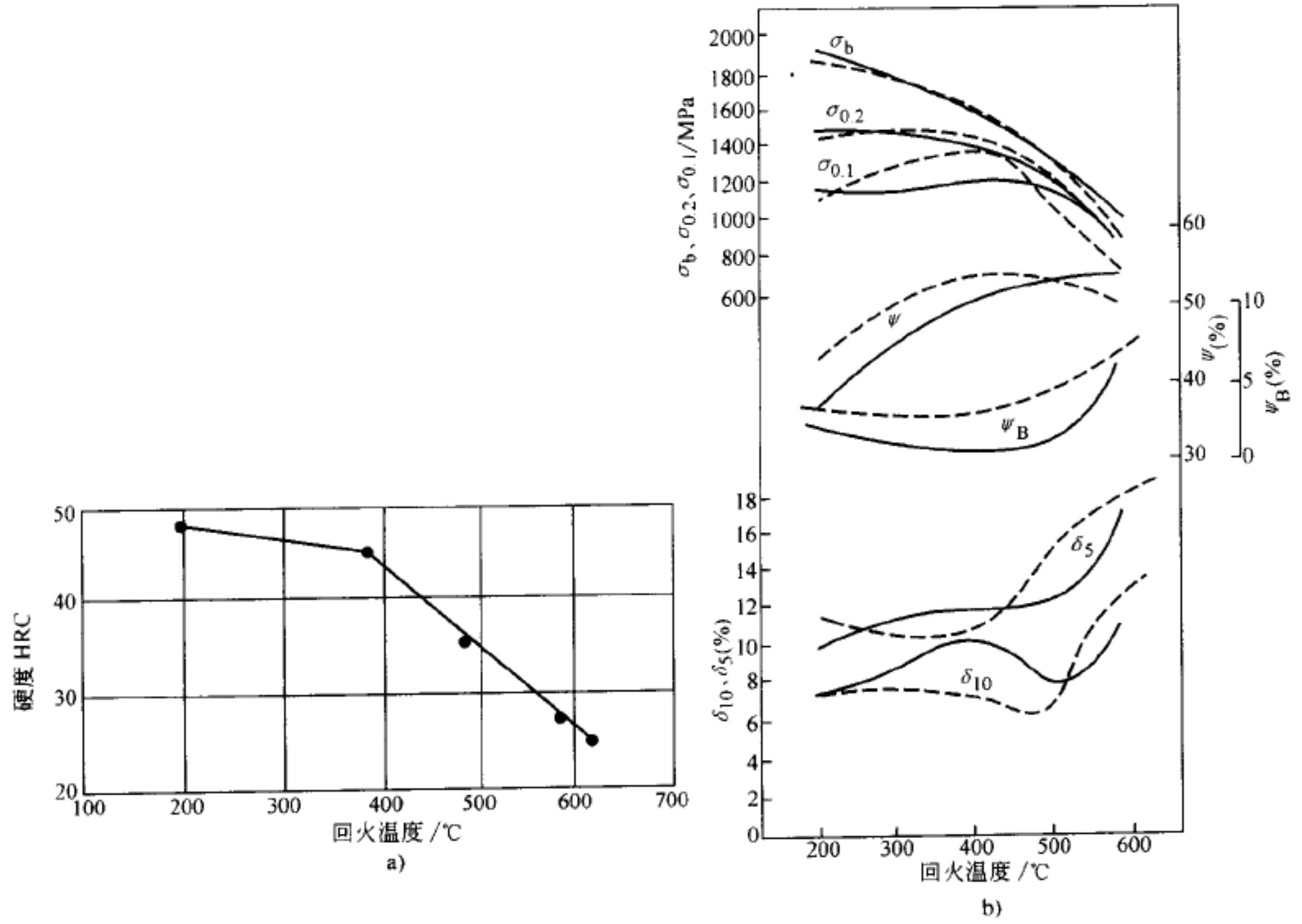
表图 5.4-51 20CrMn 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.12, Mn0.98, Cr1.29; 920°C 水淬油冷



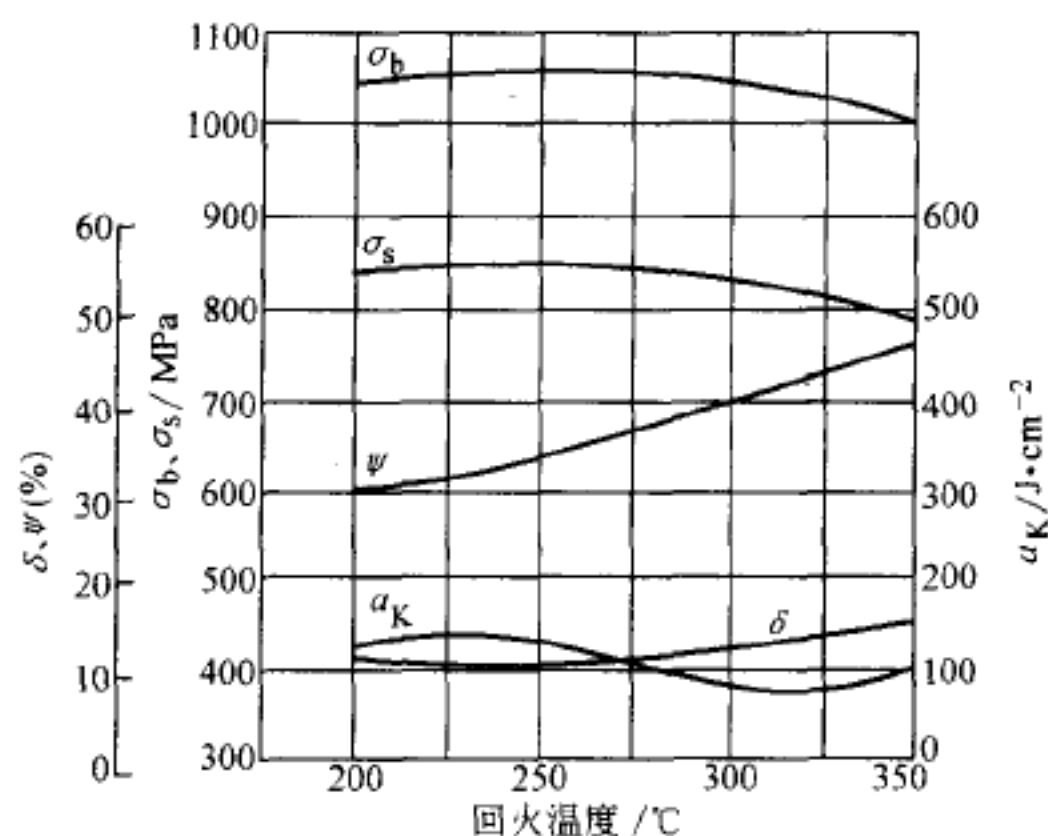
表图 5.4-52 35CrMn2 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.38, Mn1.76, Cr0.62; 880°C 油淬



表图 5.4-53 30CrMnSi 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.25 ~ 0.35,
Si0.90 ~ 1.20, Mn0.80 ~ 1.10, Cr0.80 ~ 1.10;
880℃油淬, 回火 50min 后水冷



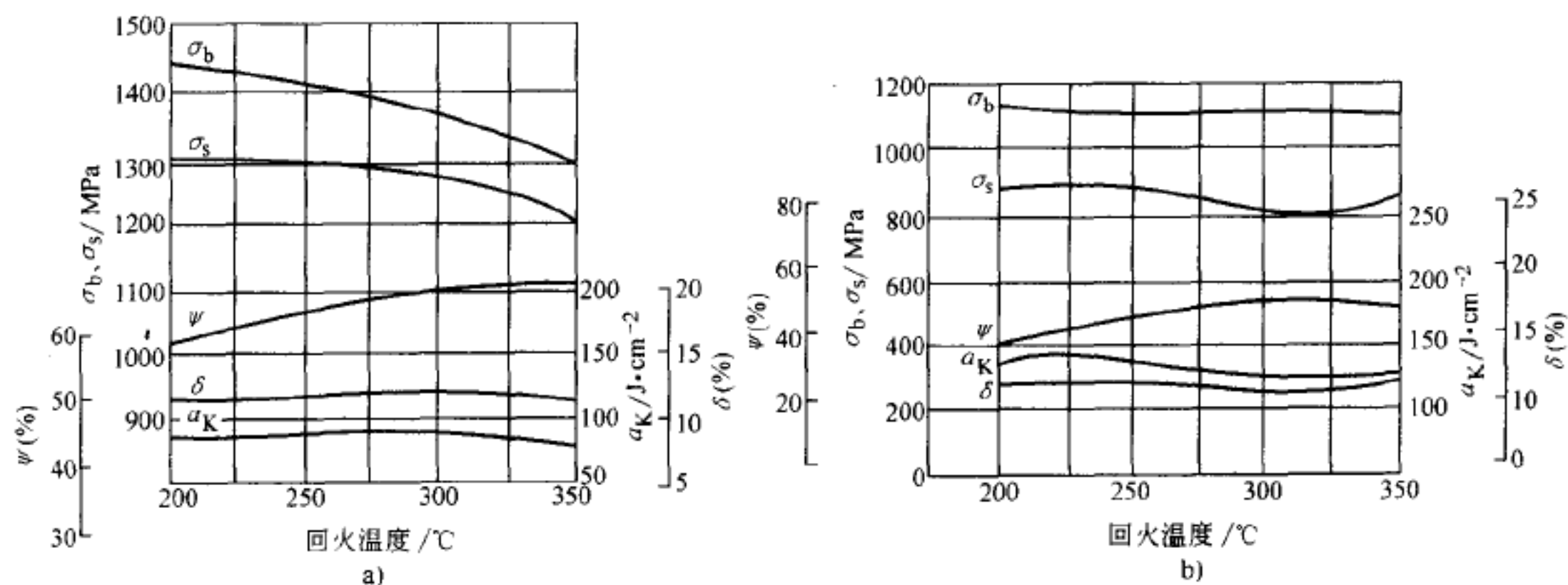
表图 5.4-54 30CrMnSiA 钢
880℃油淬
--- 去应力回火
—— 未去应力回火



表图 5.4-55 15CrMnMo 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.15, Si0.19,

Mn0.96, Cr1.09, Mo0.25; 第一次 850℃

油淬, 第二次 800℃油淬, 试样尺寸: $\phi 18\text{mm}$ 

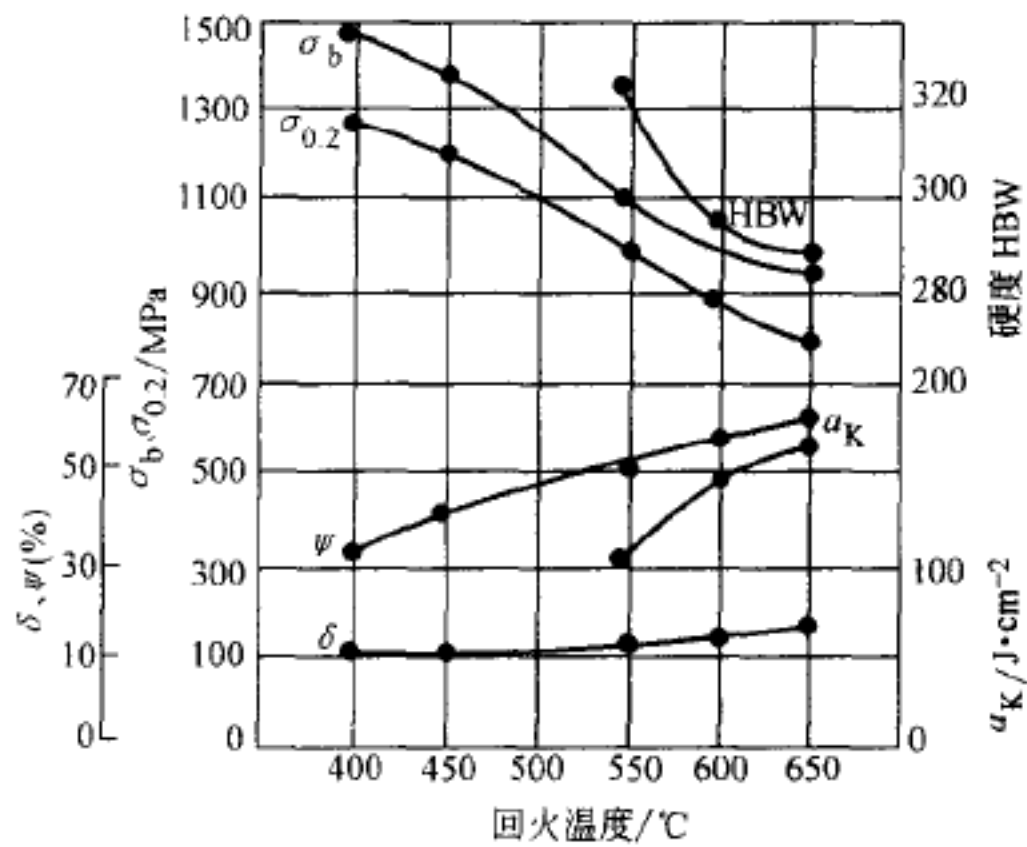
表图 5.4-56 20CrMnMo 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.21 (0.17), Si0.27 (0.30),

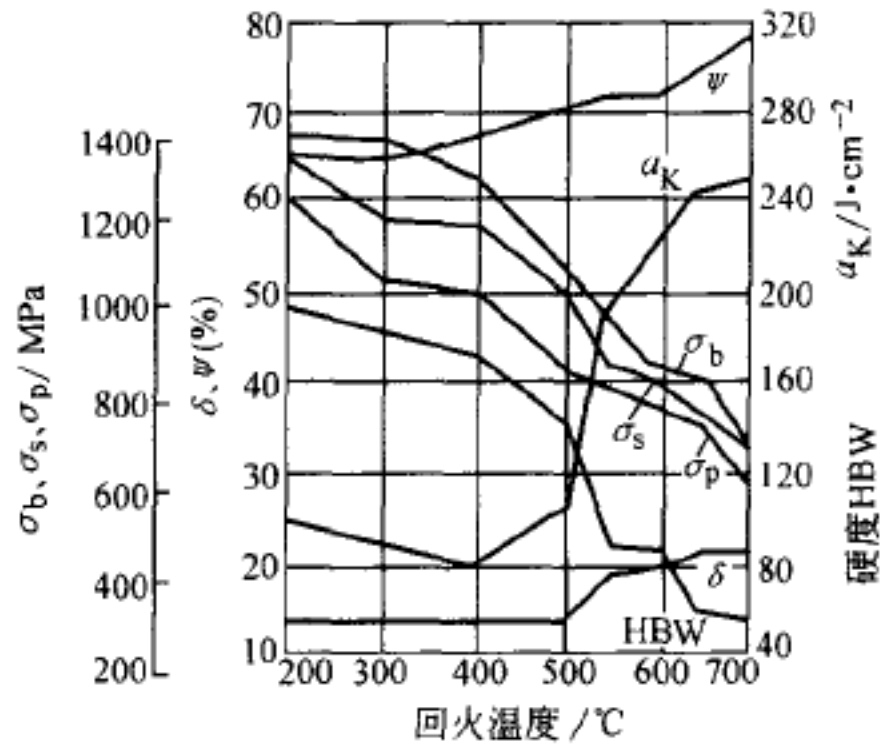
Mn0.96 (1.05), Cr1.24 (1.22), Mo0.22 (0.17);

a) 850℃油淬 b) 第一次 850℃油淬, 第二次 800℃油淬,

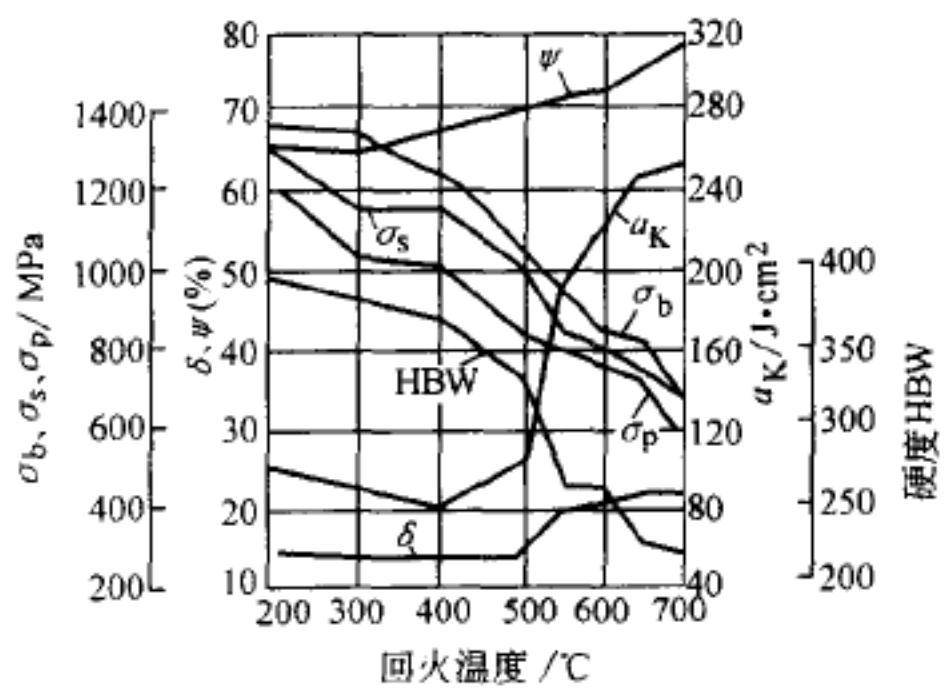
试样尺寸: $\phi 15\text{mm}$, 回火后空冷; 试样尺寸: $\phi 18\text{mm}$



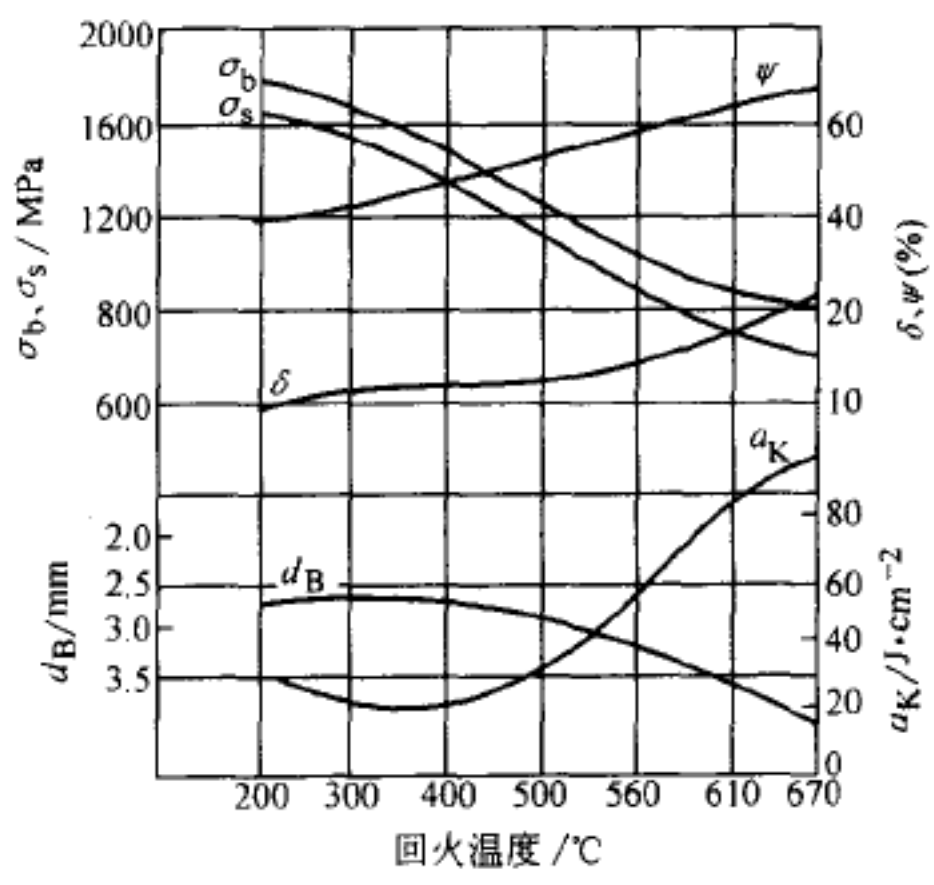
表图 5.4-57 40CrMnMo 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.40, Si0.33, Mn0.93, Cr1.00, Mo0.20; 860 ~ 880℃油淬, 回火后空冷; 热处理毛坯尺寸: φ16mm



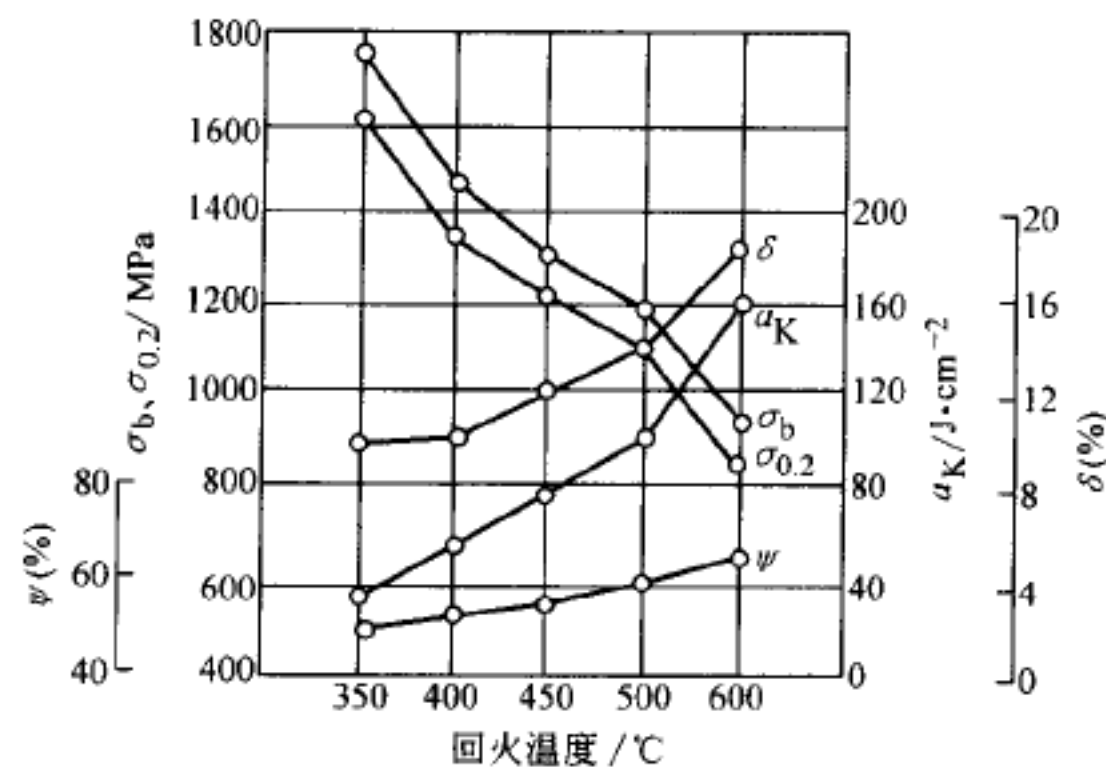
表图 5.4-58 18CrMnTi 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.17 ~ 0.24, Mn0.90 ~ 1.20, Cr1.00 ~ 1.40, Ti0.05 ~ 0.15; 880℃油淬



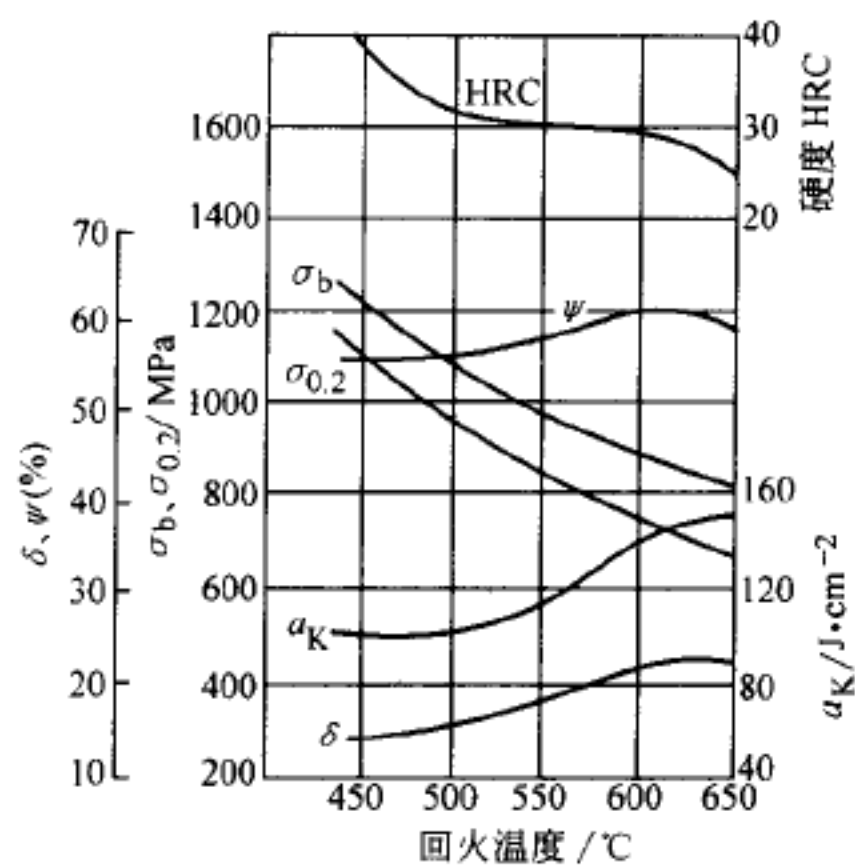
表图 5.4-59 20CrMnTi 钢
880℃油淬



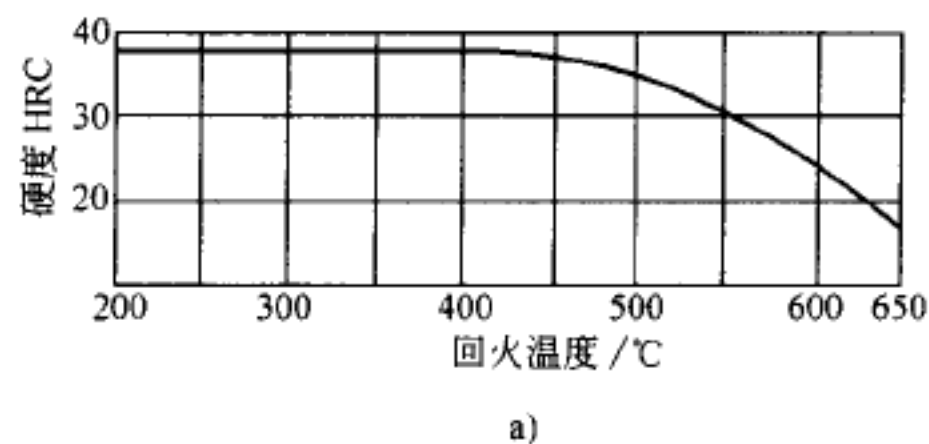
表图 5.4-60 35CrMnTi 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.36, Si0.28, Mn1.15, Cr1.64, Ti0.08



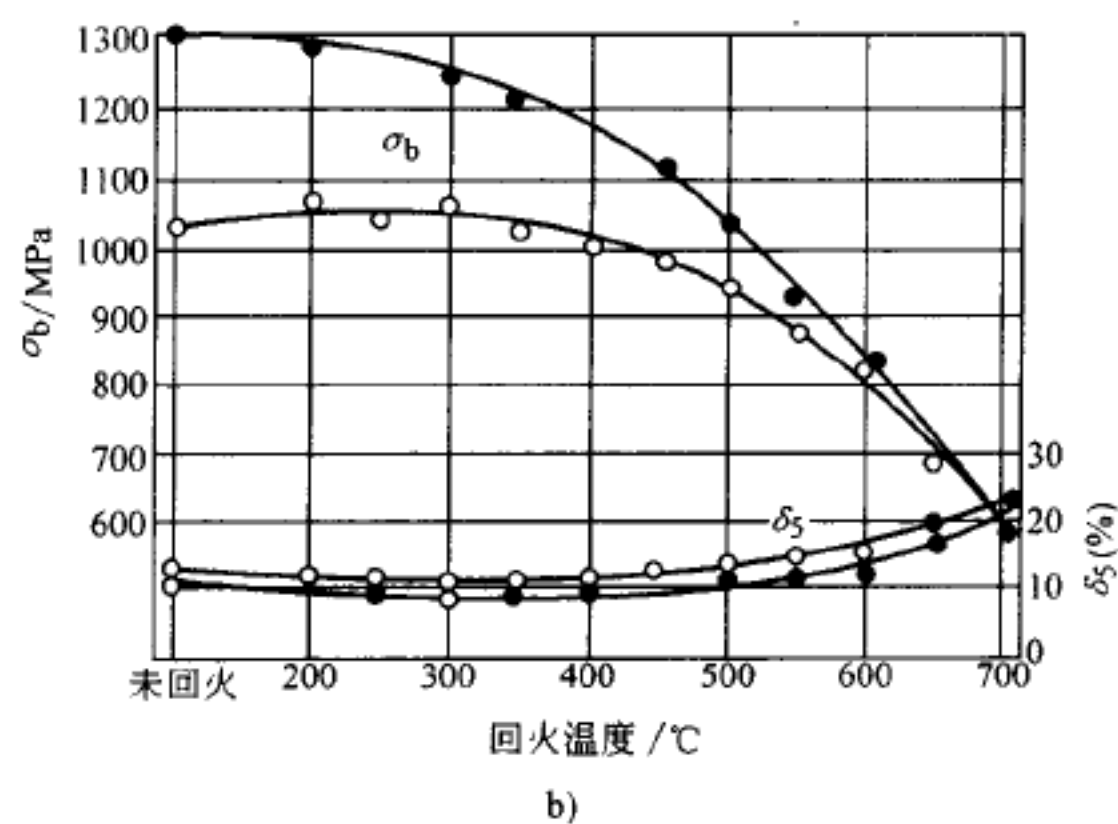
表图 5.4-61 40CrMnTi 钢



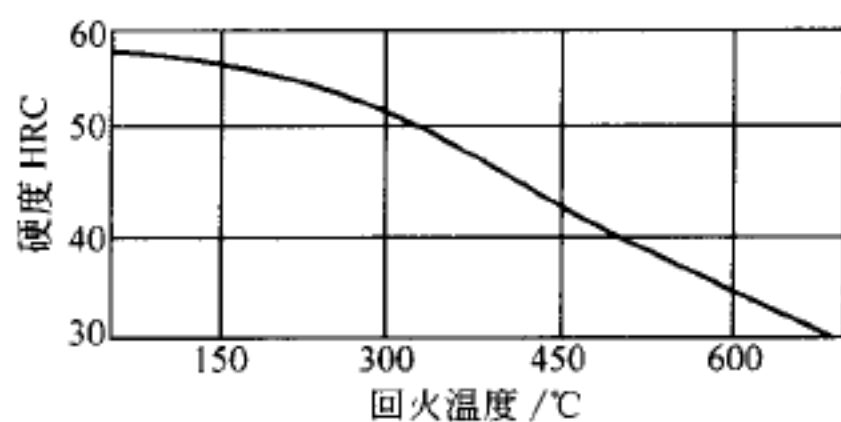
表图 5.4-62 40CrB 钢
化学成分 (质量分数) (%):
C0.42, Si0.28, Mn0.93,
Cr0.49, B0.0034



a)



b)

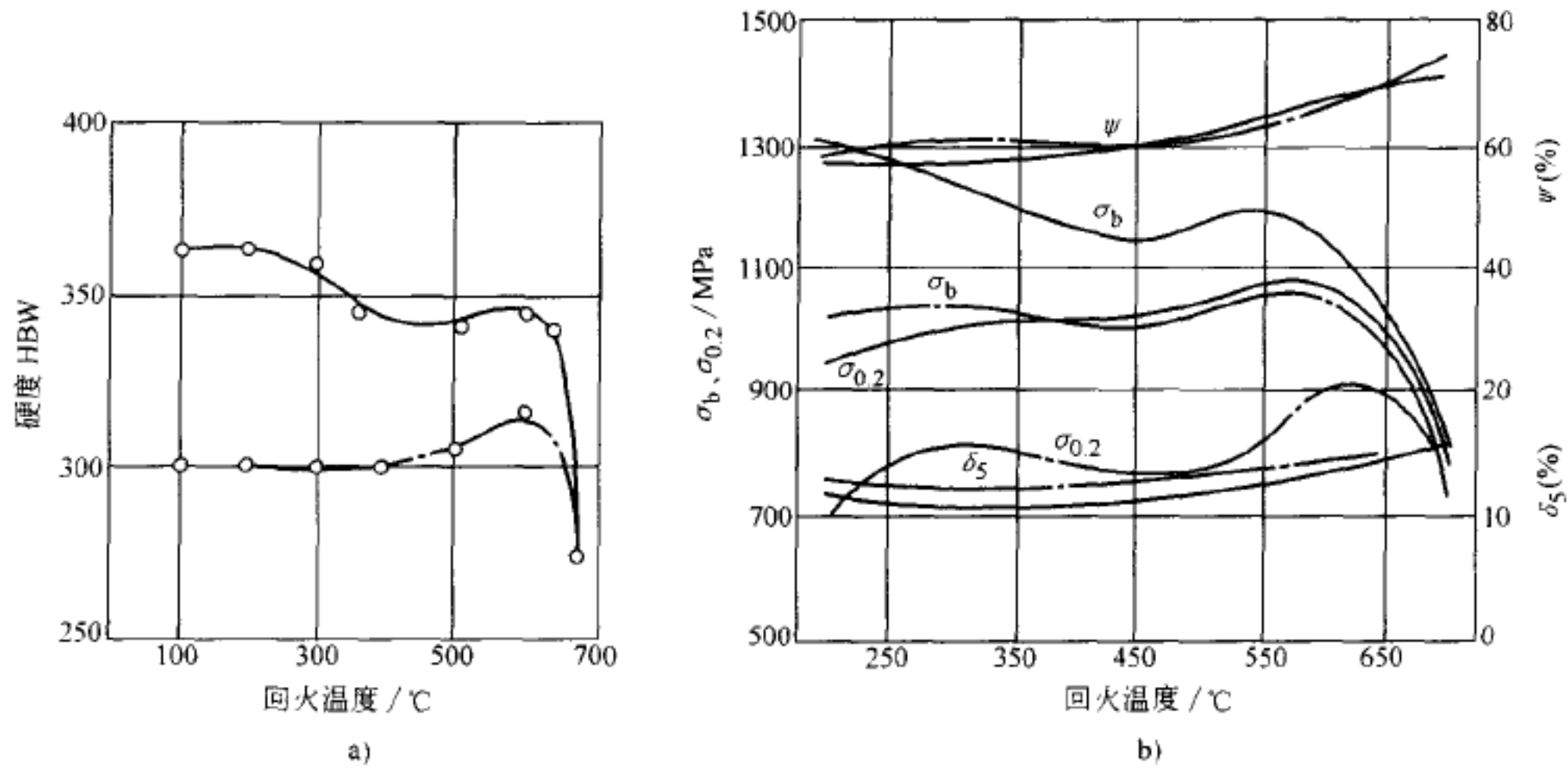


表图 5.4-63 40CrNiMoA 钢

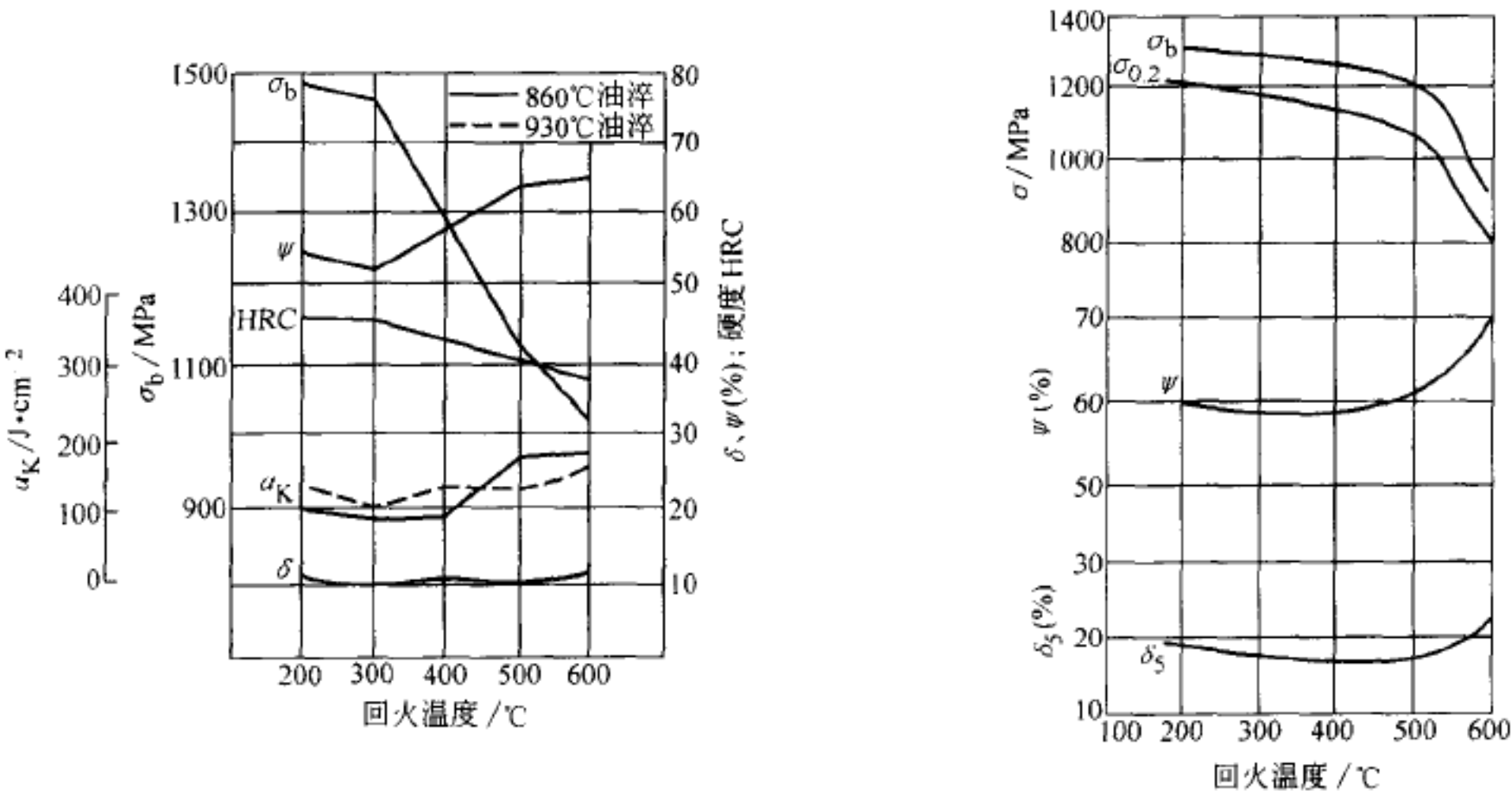
表图 5.4-64 18CrMn2MoVA 钢

—○—920°C 空冷, —●—920°C 模冷,

a) 硬度 b) 常规力学性能

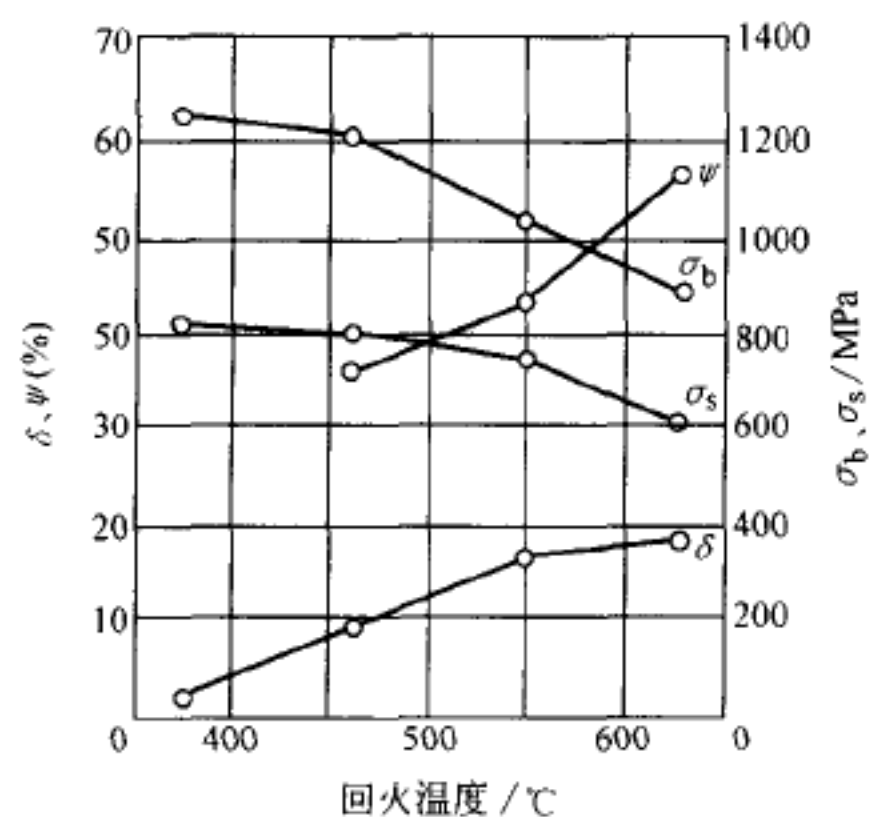


表图 5.4-65 15CrMnMoVA 钢
975℃油淬或空冷，——油淬，- - -空淬
a) 硬度 b) 常见力学性能



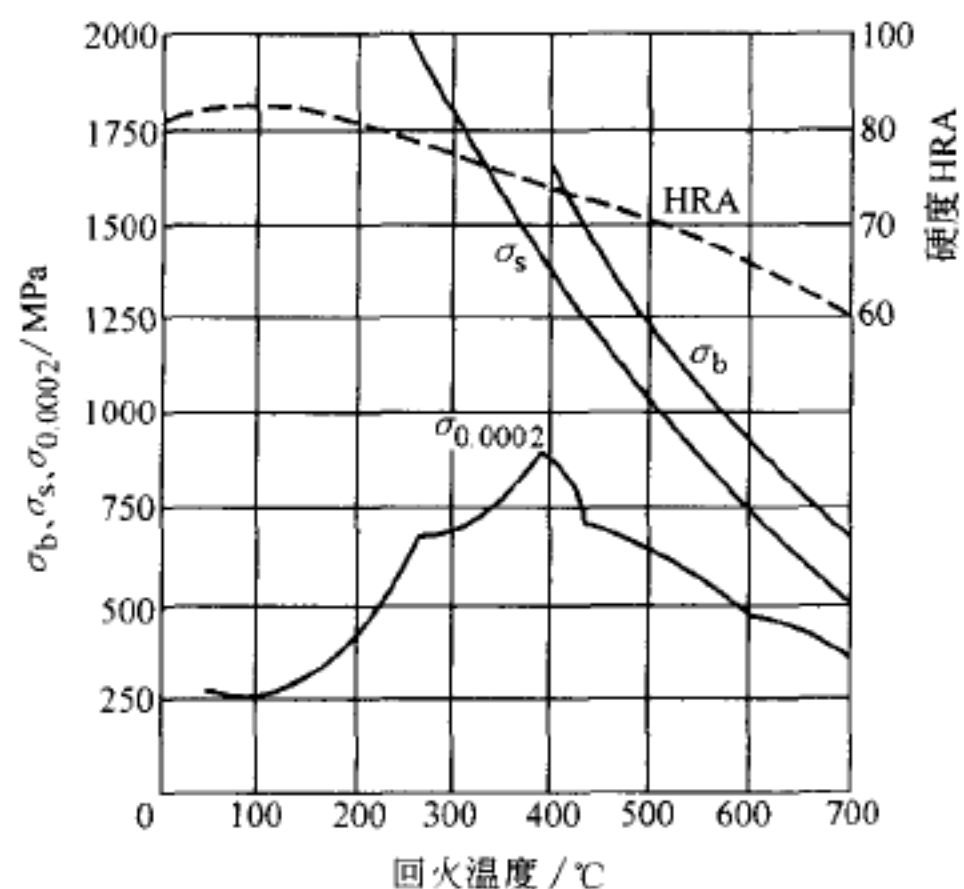
表图 5.4-66 20CrMnMoVB 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.24, Si0.28,
Mn1.01, Cr0.35, Mo0.26, V0.08, B 未分析;
880~900℃正火, ——860℃油淬; - - -930℃油淬

表图 5.4-67 18CrNiWA 钢
850℃空淬



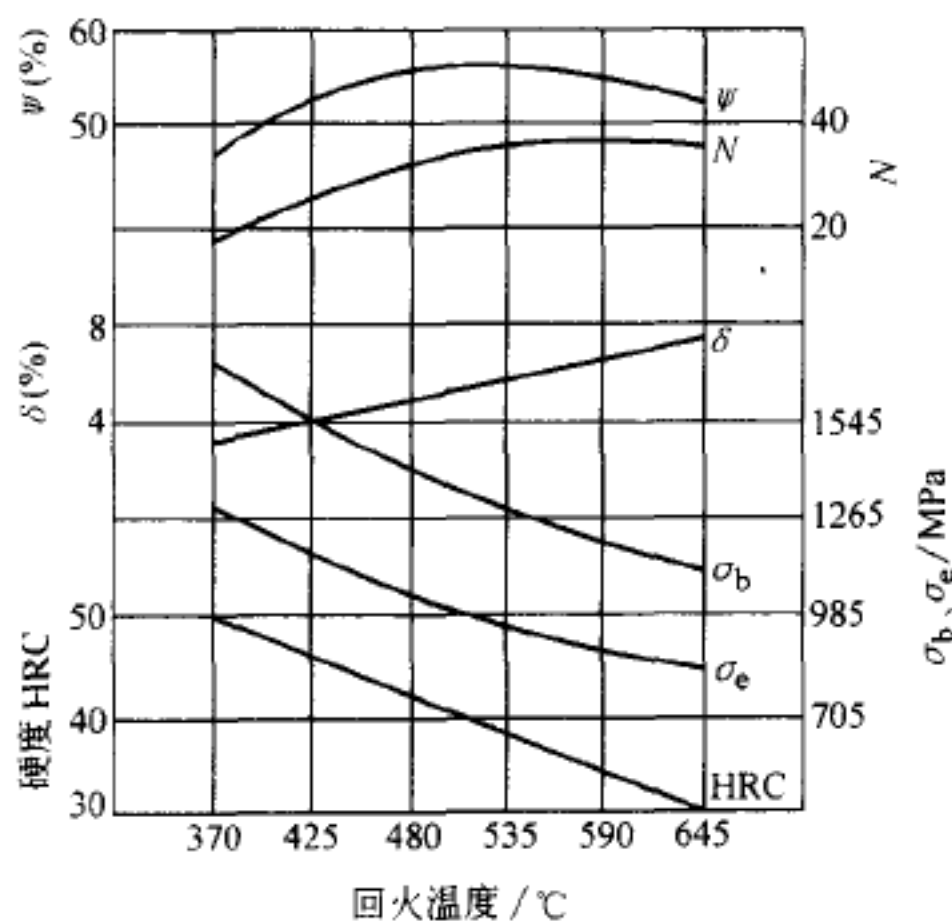
表图 5.4-68 65 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.71,
Si0.15, Mn0.67



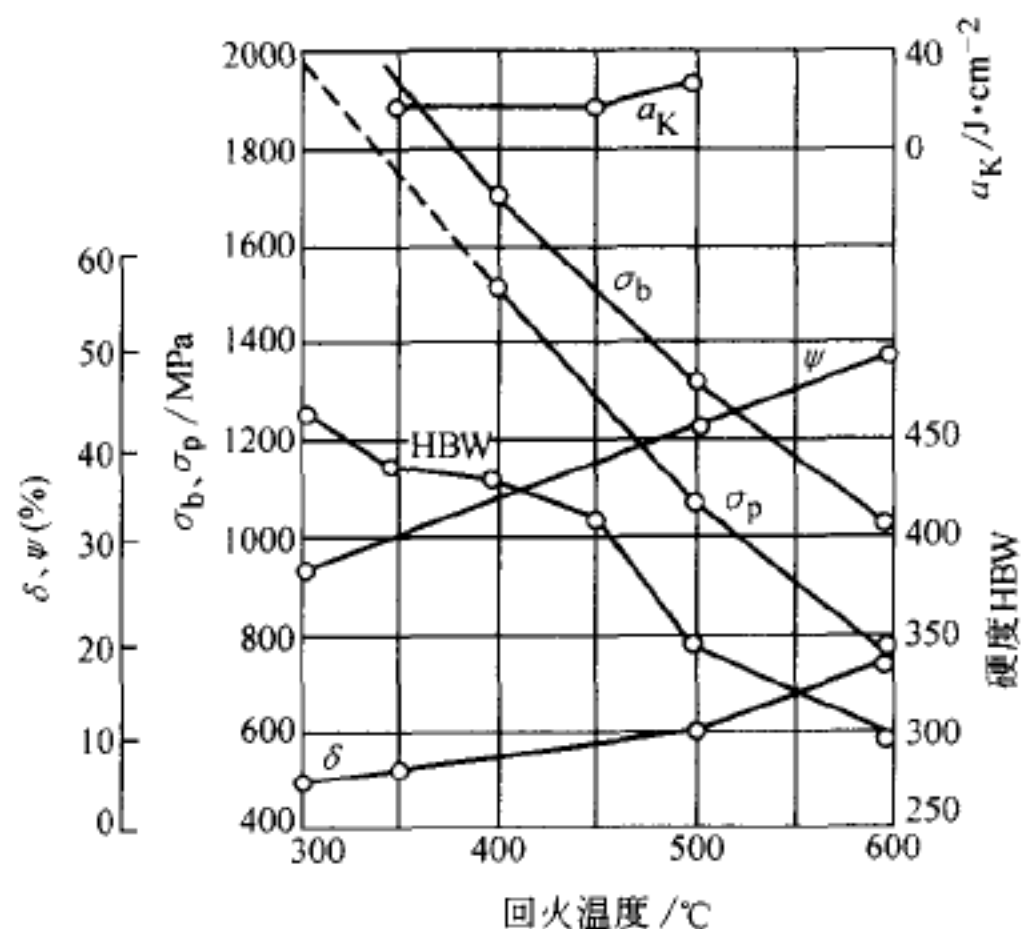
表图 5.4-69 85 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.82,
Si0.27, Mn0.84; 840℃ 淬火



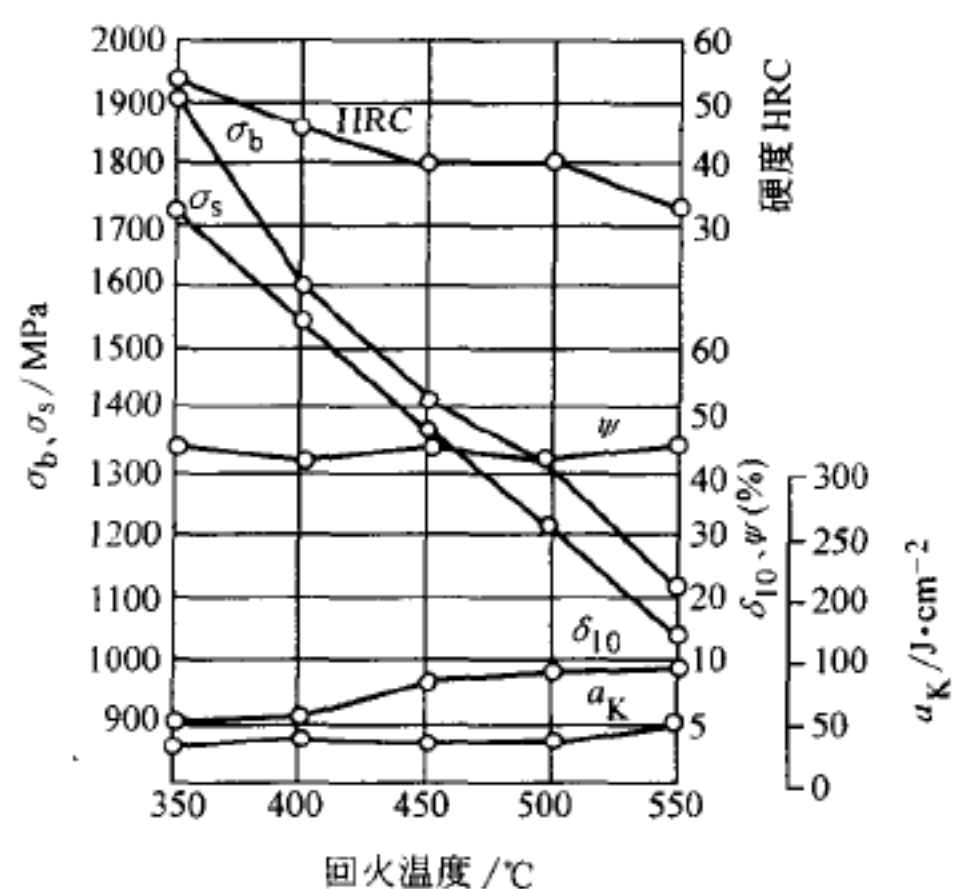
表图 5.4-70 65Mn 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.65,
Mn0.85; $\phi 3\text{mm}$ 钢丝油淬
(N —完全扭转, 试样长度为 $100d$)

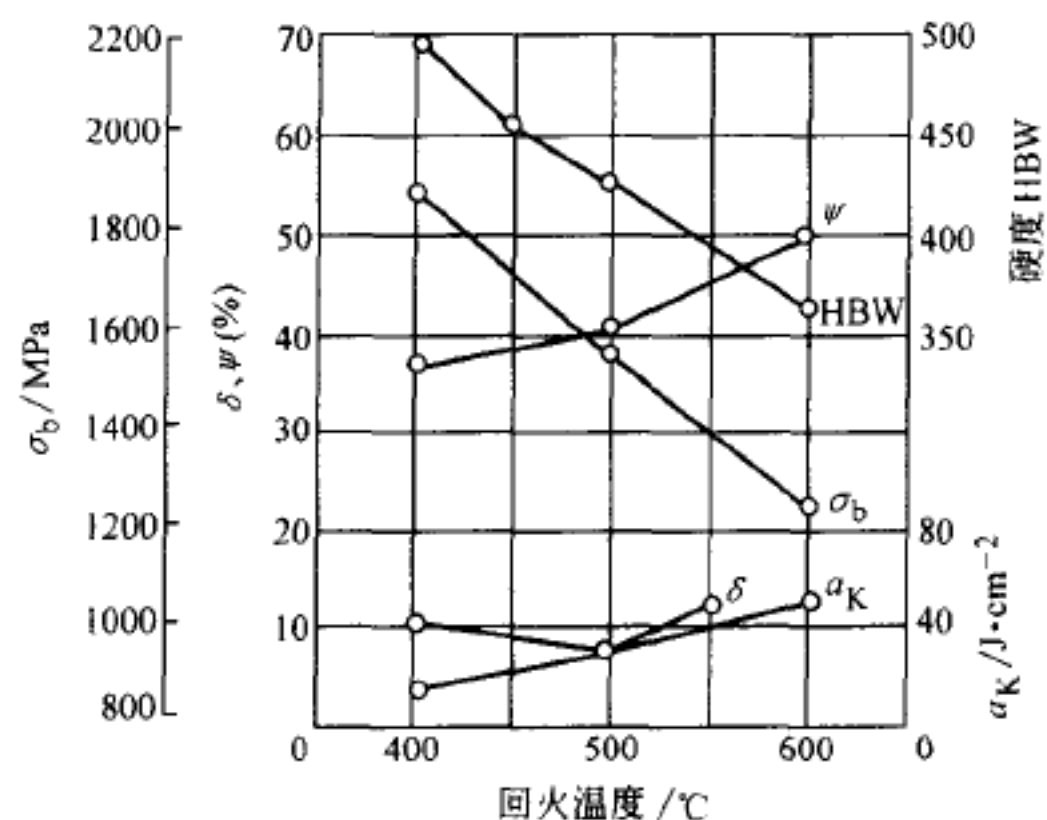


表图 5.4-71 60Si2Mn 钢

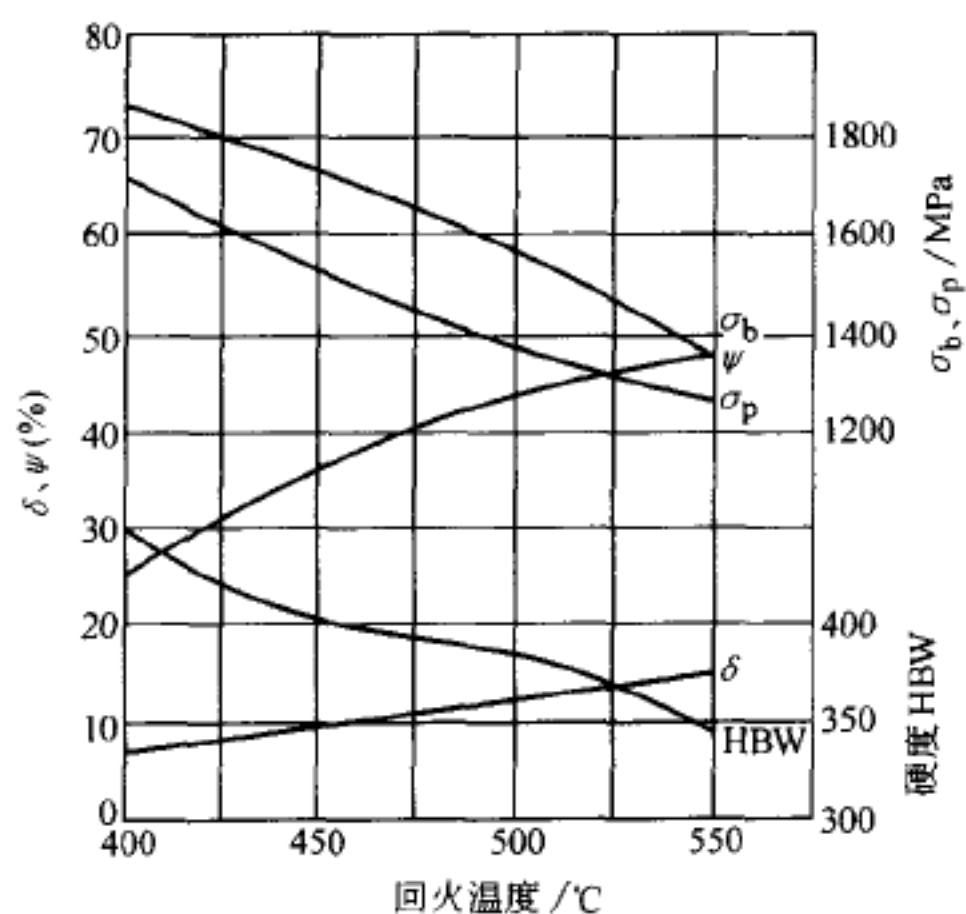
化学成分 (质量分数) (%): C0.50,
Si1.66, Mn0.52; 850℃ 油淬



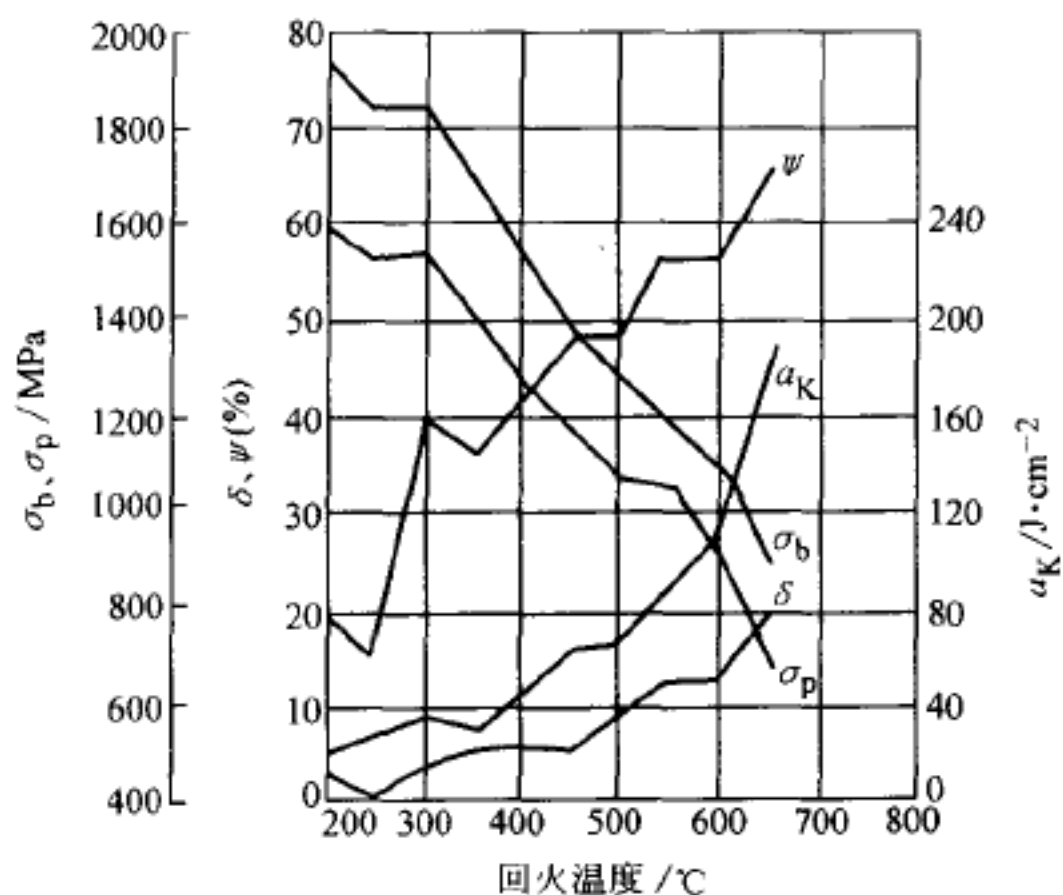
表图 5.4-72 55SiMnVB 钢
880℃油淬



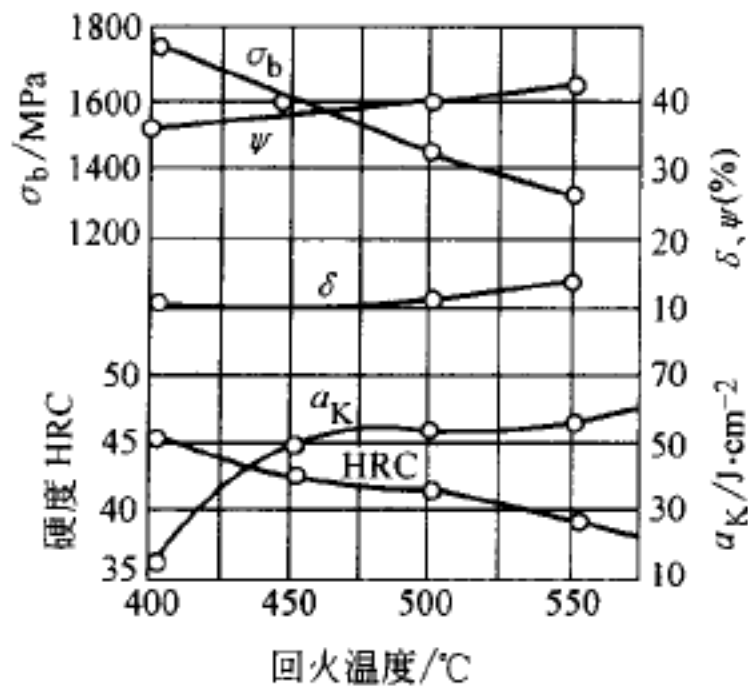
表图 5.4-73 50CrMn 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.53,
Si0.17, Mn0.77, Cr1.36; 840℃油淬



表图 5.4-74 50CrMnVA 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.50,
Si0.07, Mn0.92, Cr1.02, V0.20; 825℃油淬

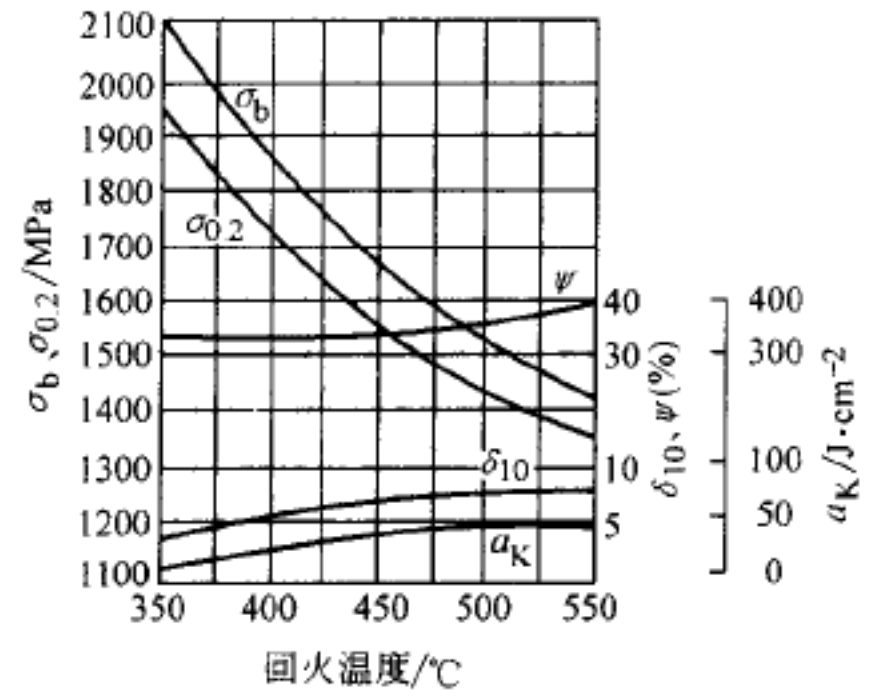


表图 5.4-75 50CrVA 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.45,
Si0.37, Mn0.66, Cr1.02,
V0.24, Ni0.14; 860℃油淬

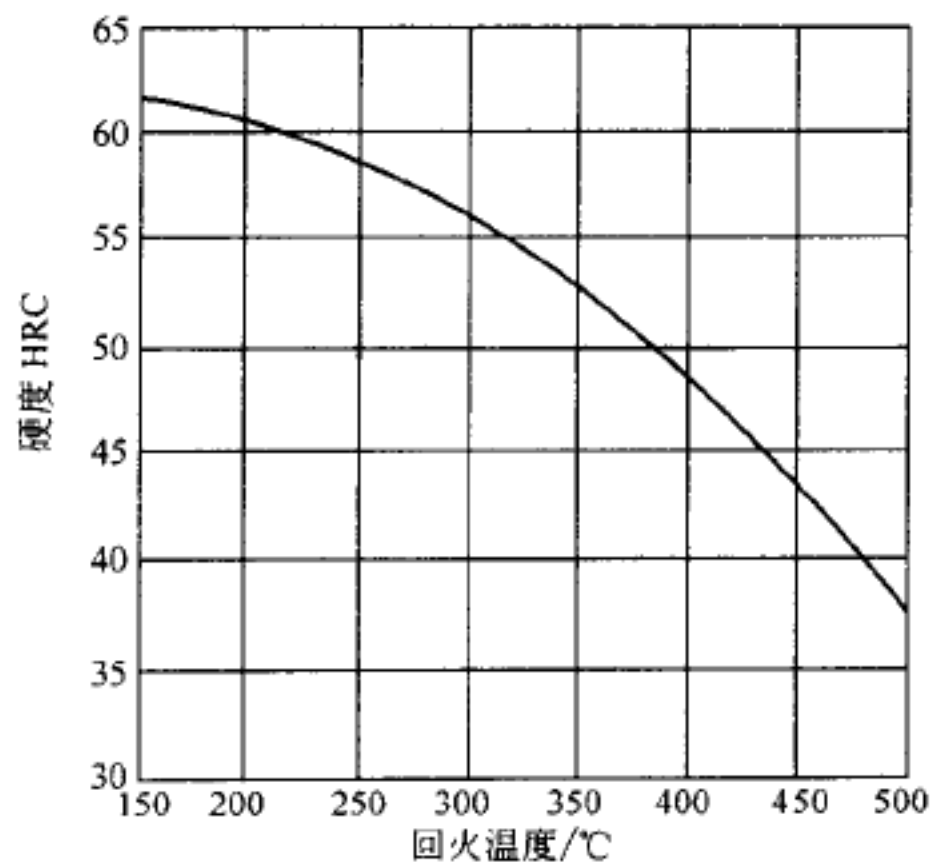


表图 5.4-76 55SiMnMoV 钢

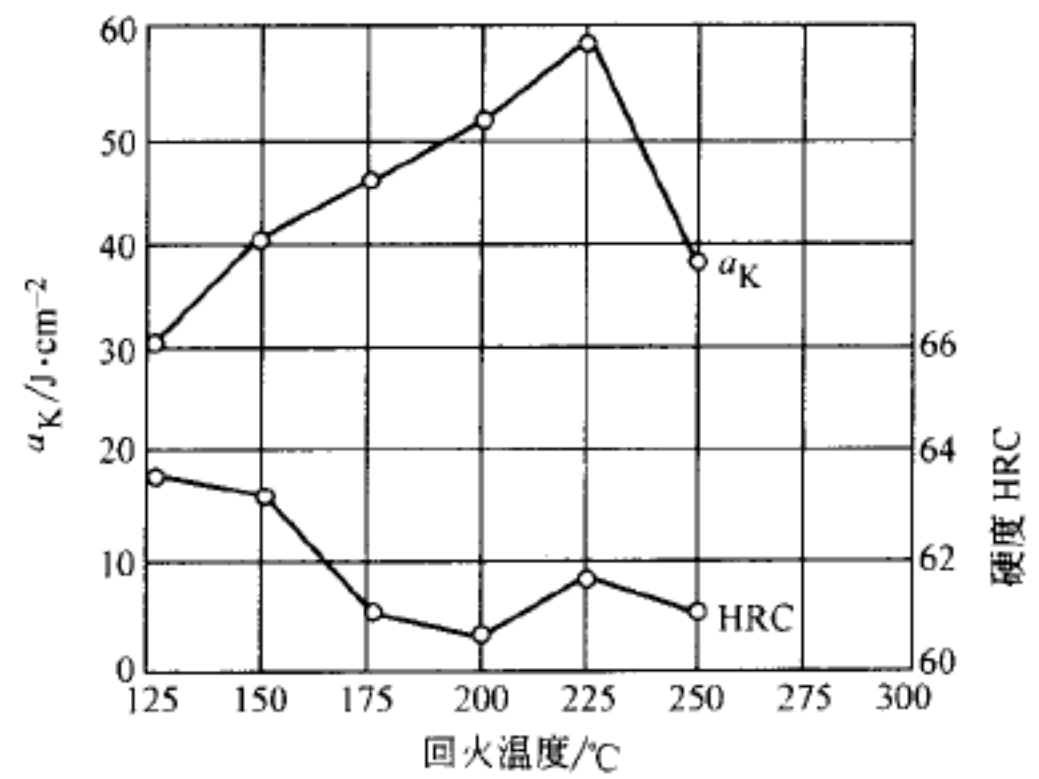
化学成分 (质量分数) (%): C0.57,
Si1.00, Mn0.95, Mo0.12, V0.16,
S0.018, P0.002; 860°C 淬火



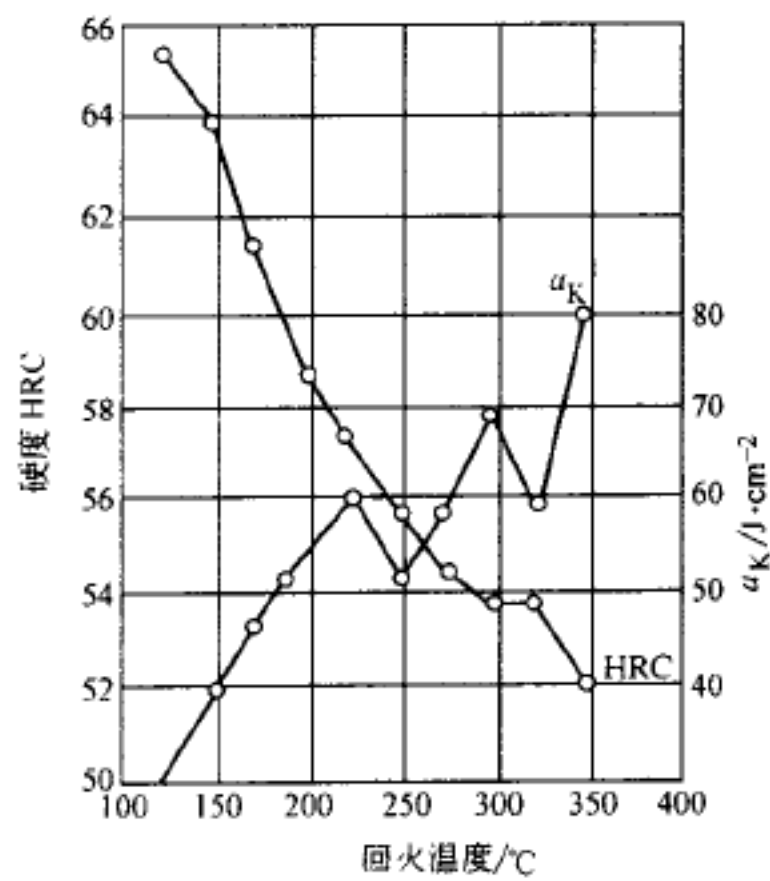
表图 5.4-77 55SiMnMoVNb 钢



表图 5.4-78 GCr6 钢

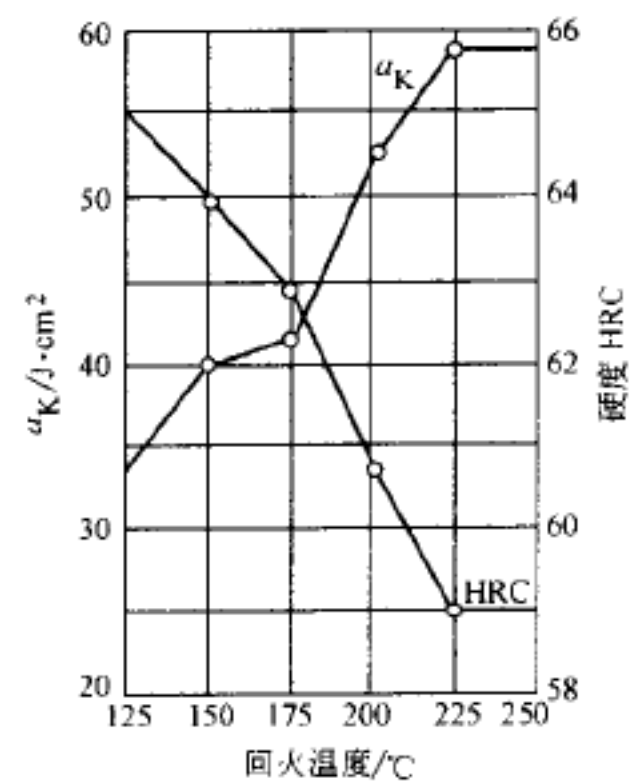


表图 5.4-79 GCr6SiMn 钢



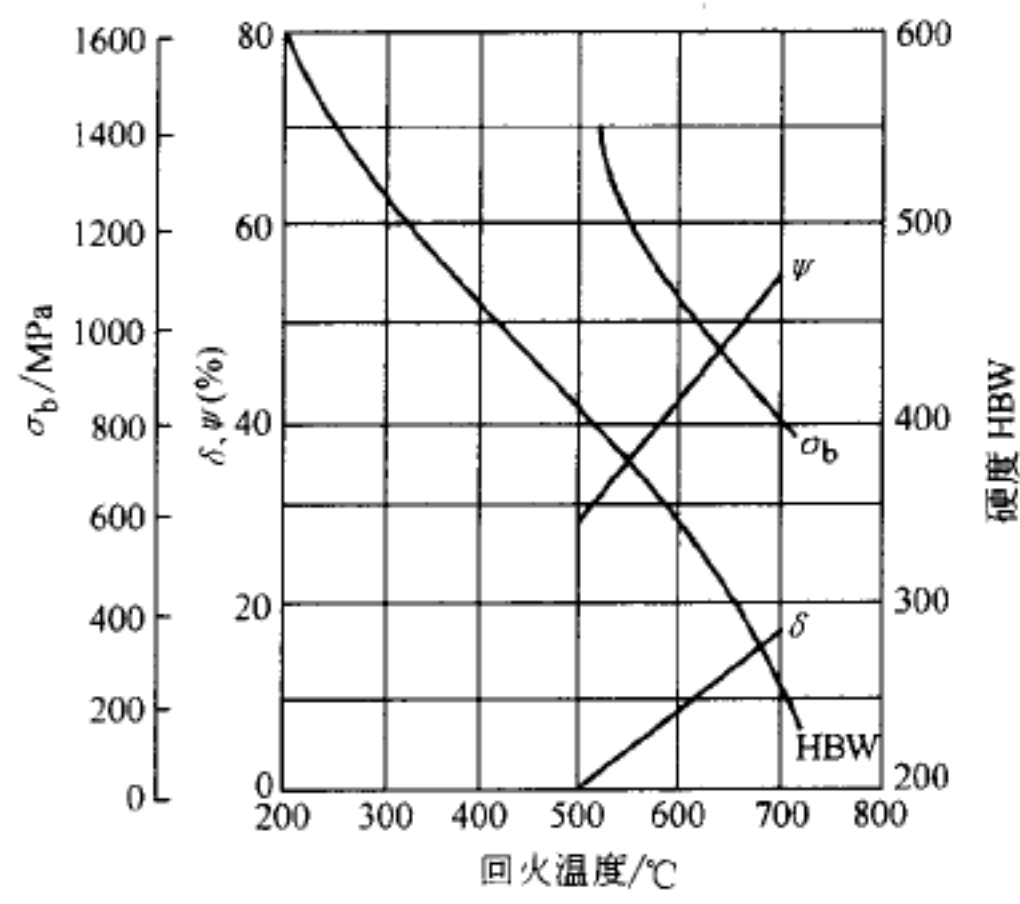
表图 5.4-80 GCr9 钢

化学成分 (质量分数) (%): C1.09, Si0.29,
Mn0.35, Cr1.21

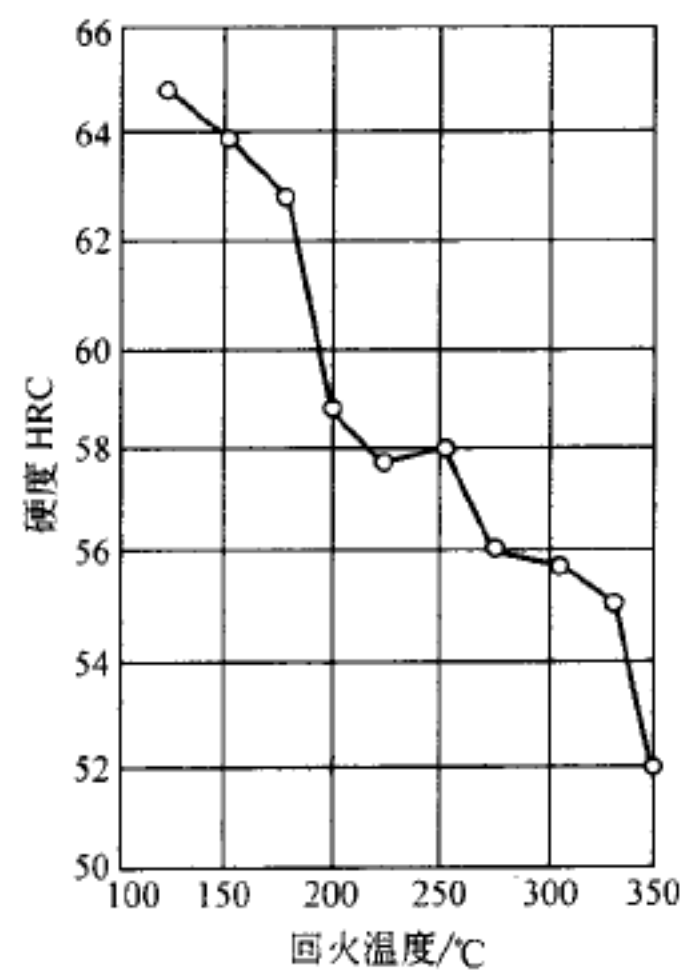


表图 5.4-81 GCr9SiMn 钢

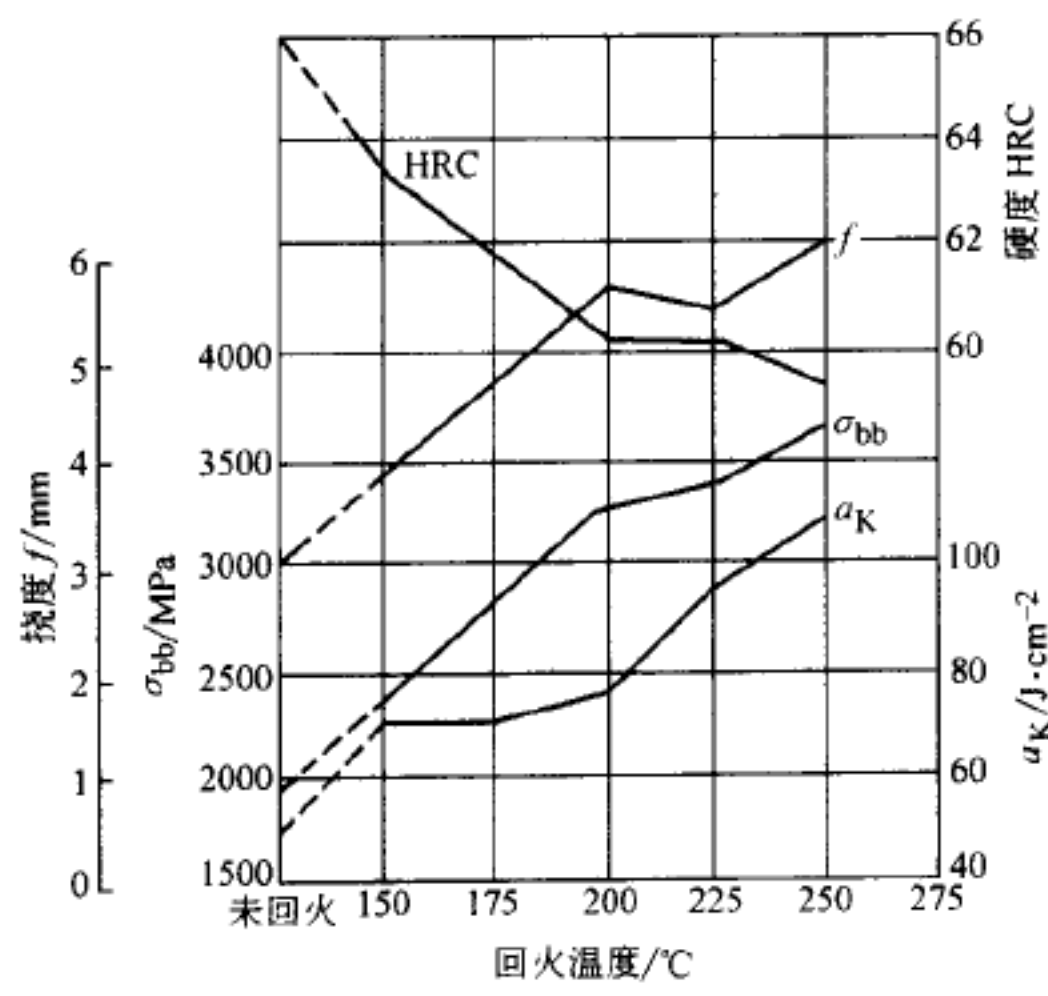
化学成分 (质量分数) (%): C1.07, Si0.45,
Mn1.20, Cr1.08, S0.05, P0.020



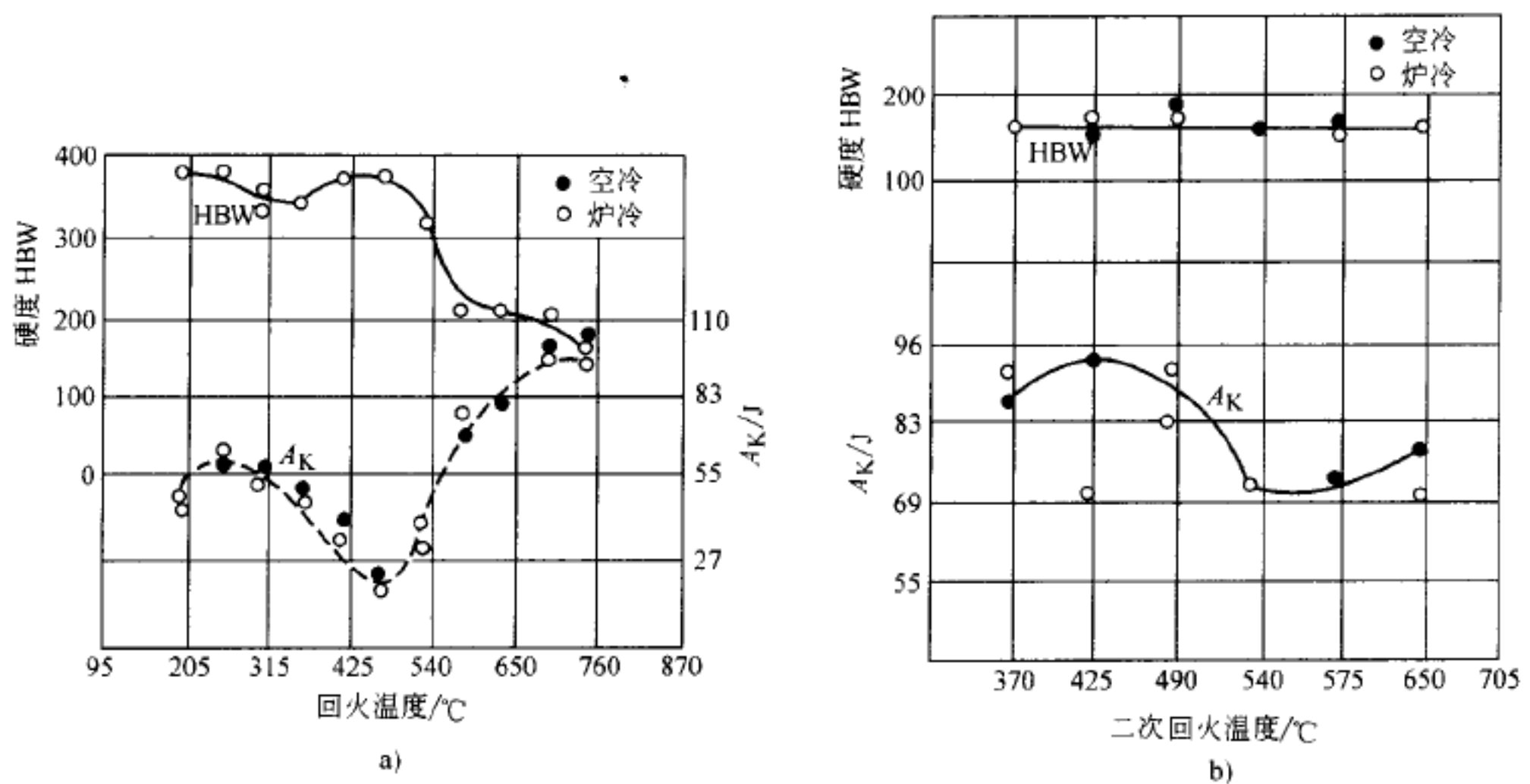
表图 5.4-82 GCr15 钢



表图 5.4-83 GCr15SiMn 钢
化学成分 (质量分数) (%): C1.01, Si0.52,
Mn1.12, Cr1.38, S0.004, P0.012



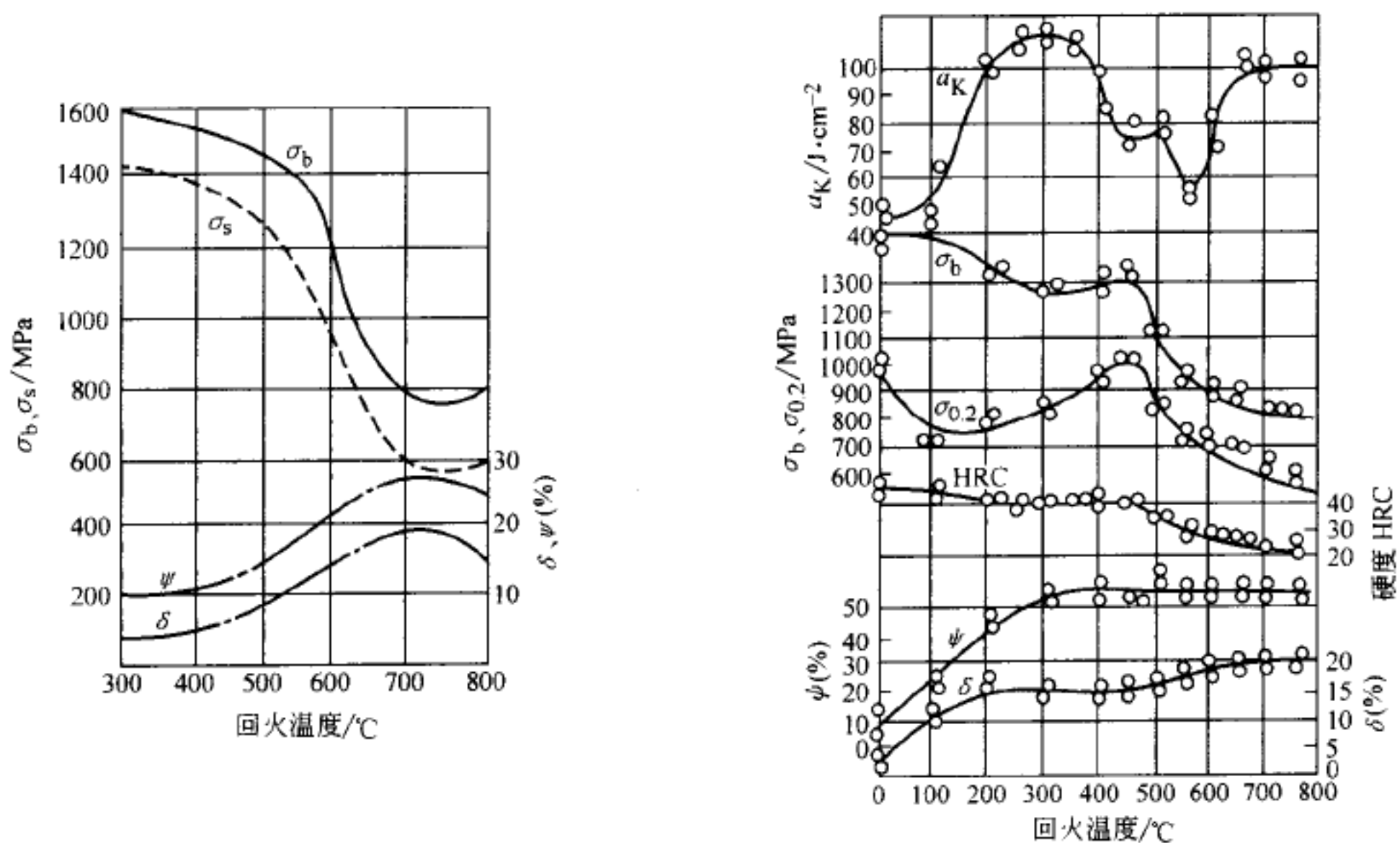
表图 5.4-84 GCrMnMoV 钢



表图 5.4-85 1Cr13 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.07, Si0.28, Mn0.50, Cr12.38;

a) 955℃油淬 b) 955℃油淬、两次回火, 第一次 760℃, 第二次按图中温度回火



表图 5.4-86 2Cr13 钢

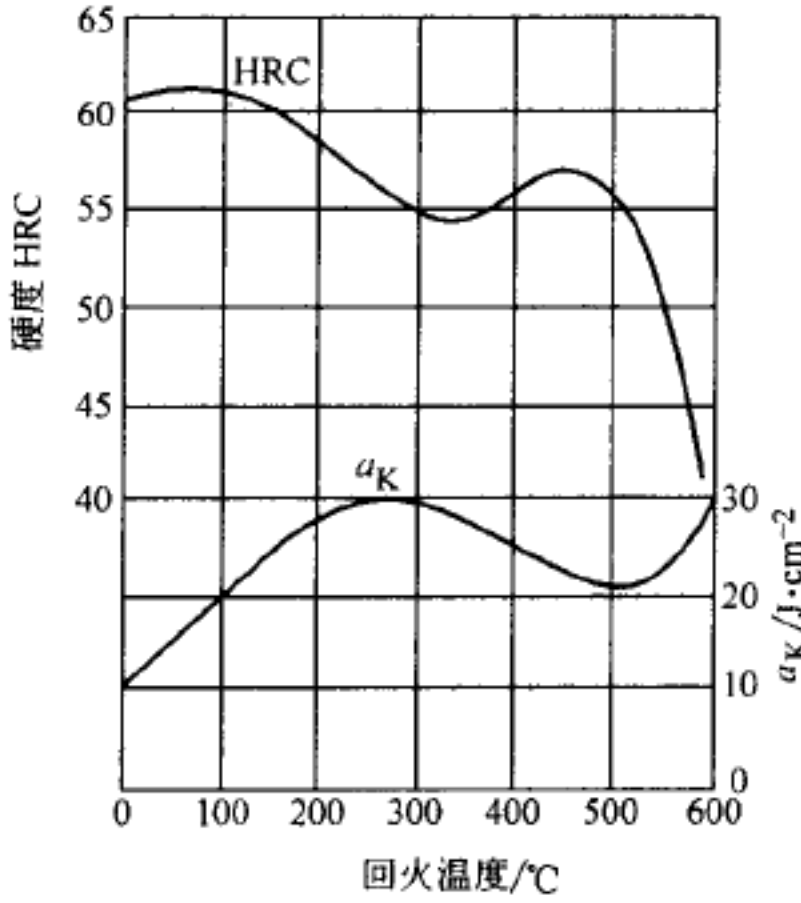
980 ~ 1000℃油淬

表图 5.4-87 1Cr17Ni2 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.14, Si0.47,

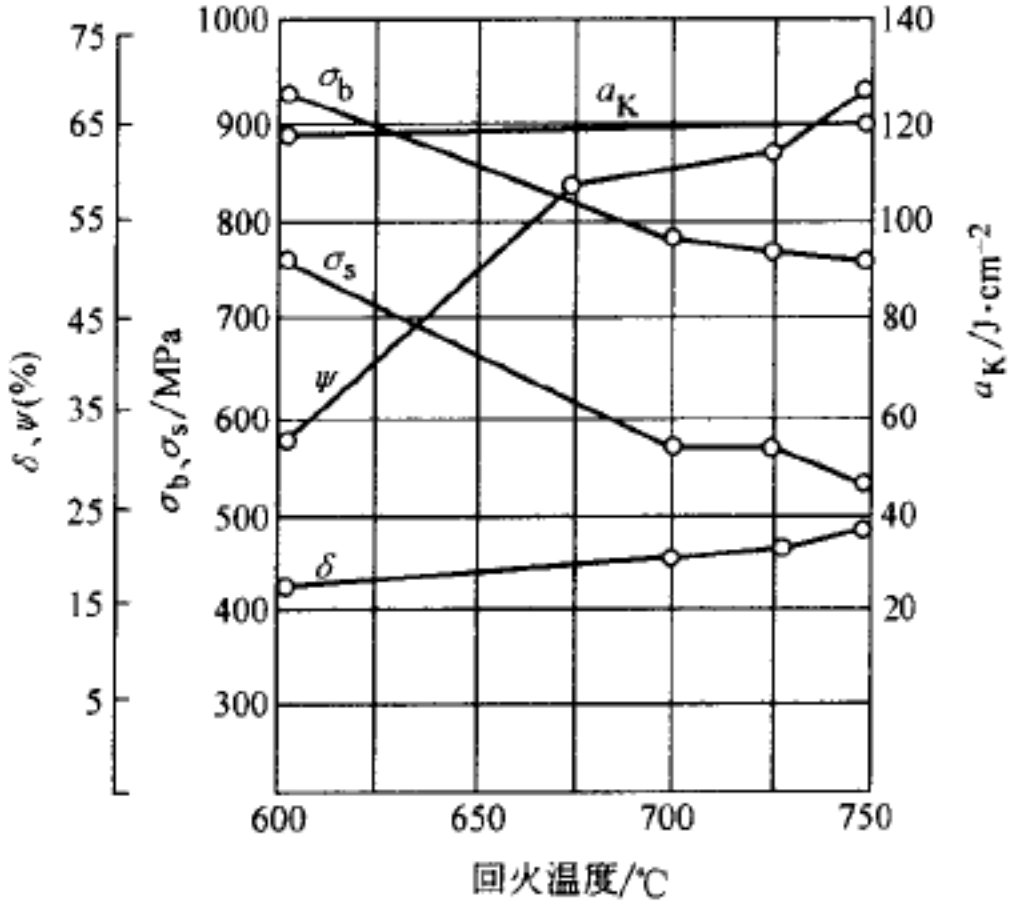
Mn0.62, P0.03, S0.005, Cr16.87,

Ni2.00; 1060℃淬火



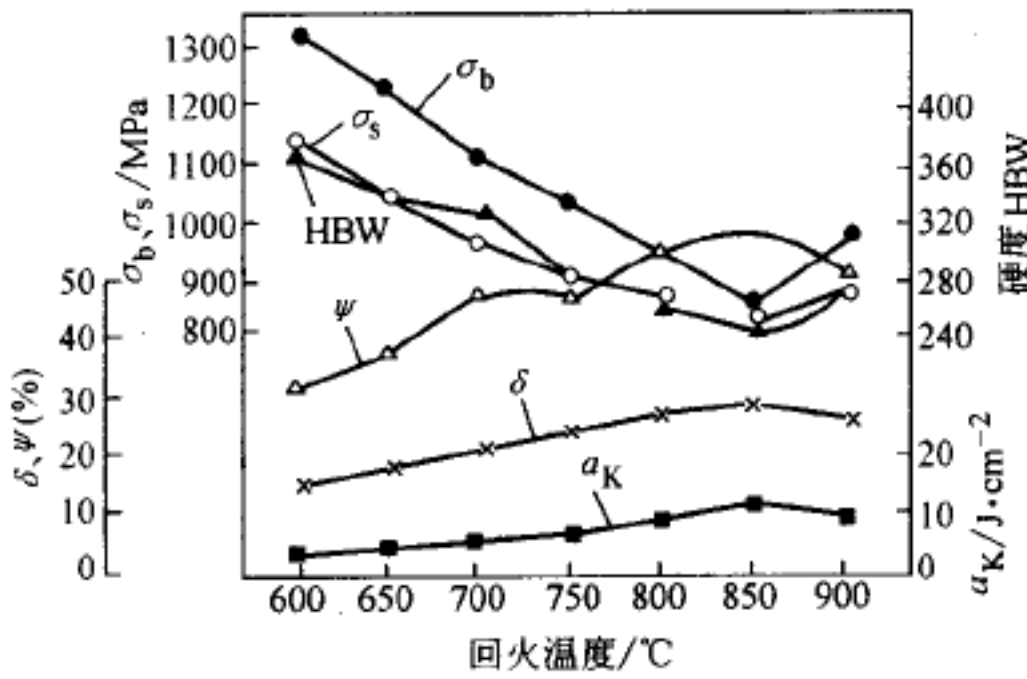
表图 5.4-88 9Cr18 钢

化学成分 (质量分数) (%): C1.0, Cr17.0



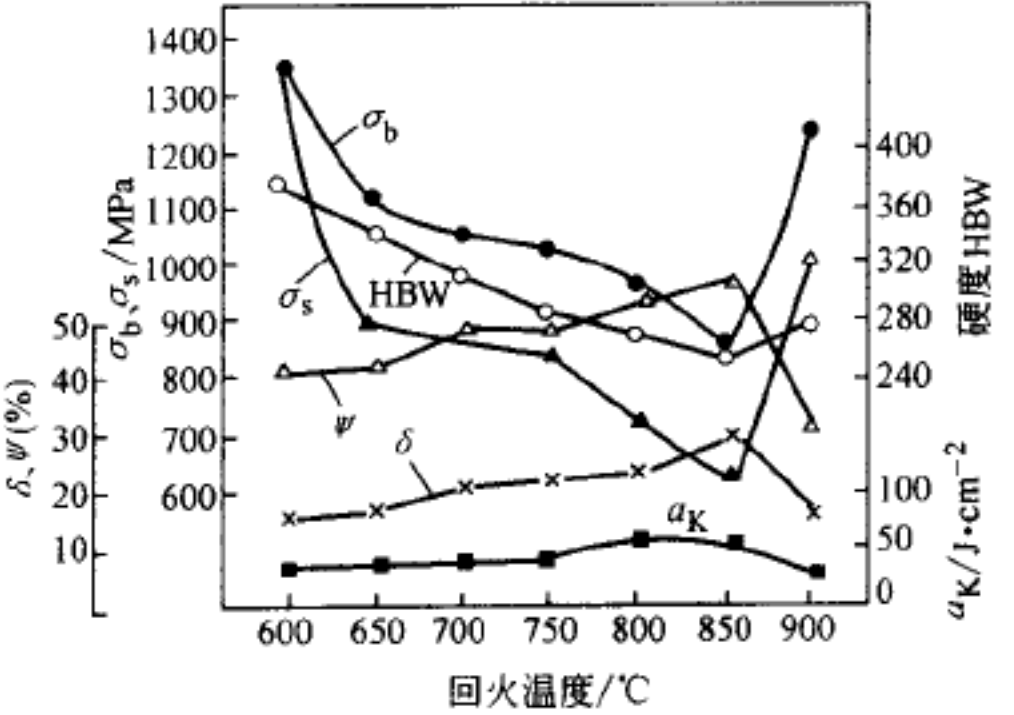
表图 5.4-89 Cr11MoV 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.17, Si0.20, Mn0.71, Cr10.12, Ni0.70, Mo0.70, V0.33, Ti0.94



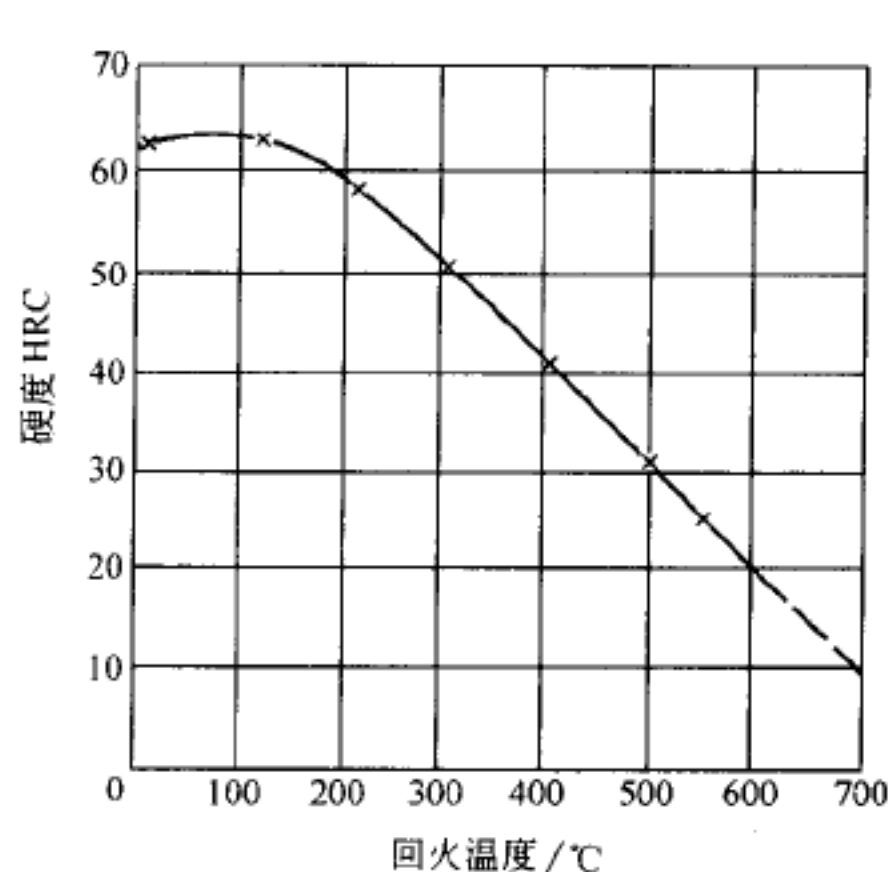
表图 5.4-90 4Cr9Si2 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.48, Si3.15, Mn0.32, Cr9.75; 1050°C 油淬

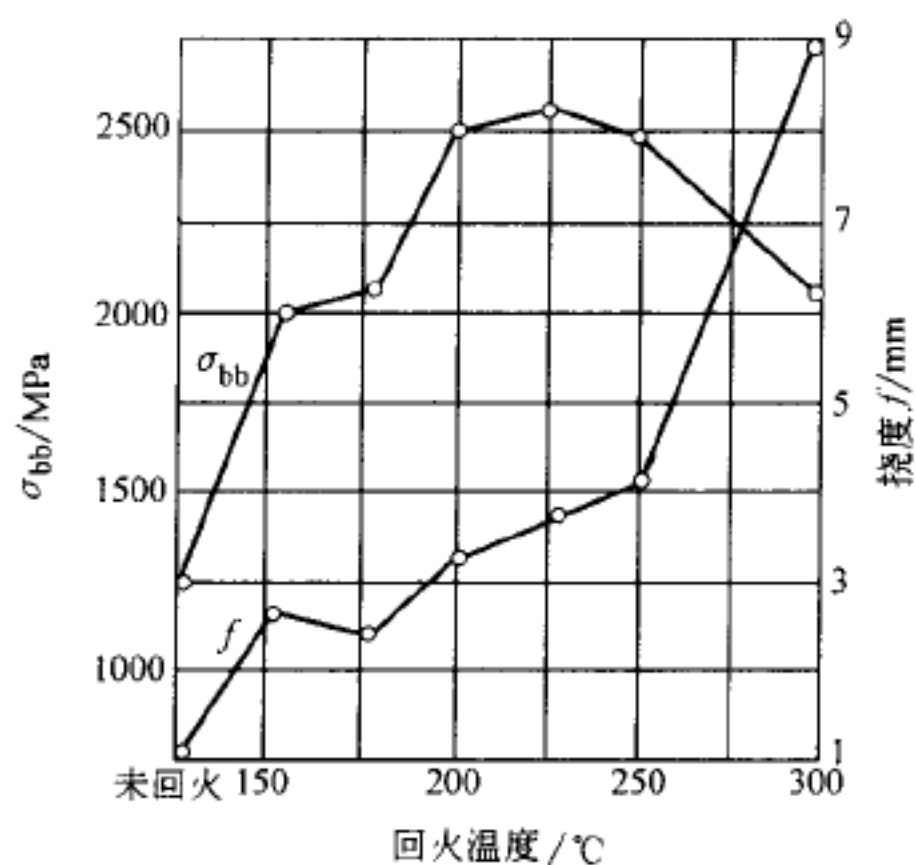


表图 5.4-91 4Cr10Si2Mo 钢

化学成分 (质量分数) (%): C0.40, Si2.60, Mn0.40, Cr11.34, Mo0.99; 1030°C 油淬

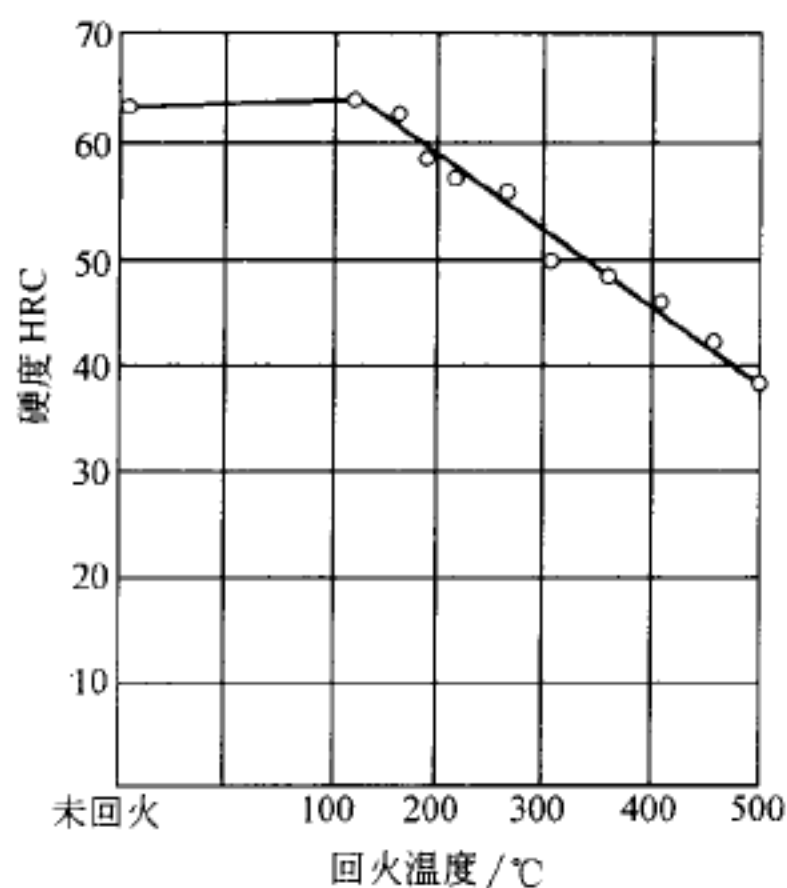
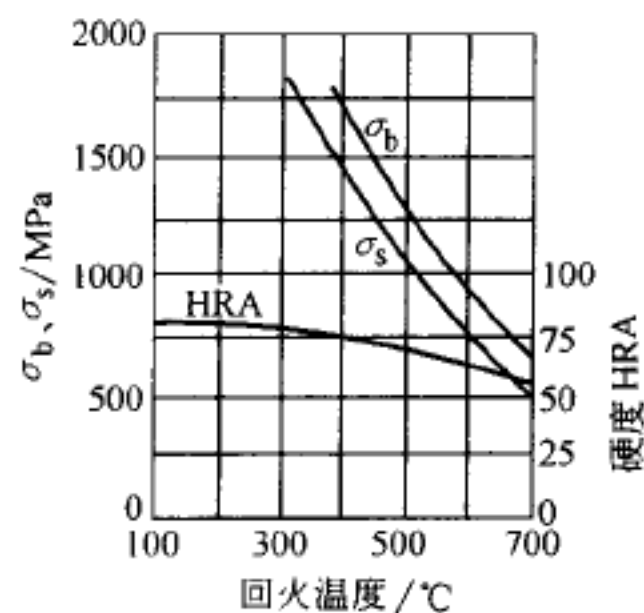
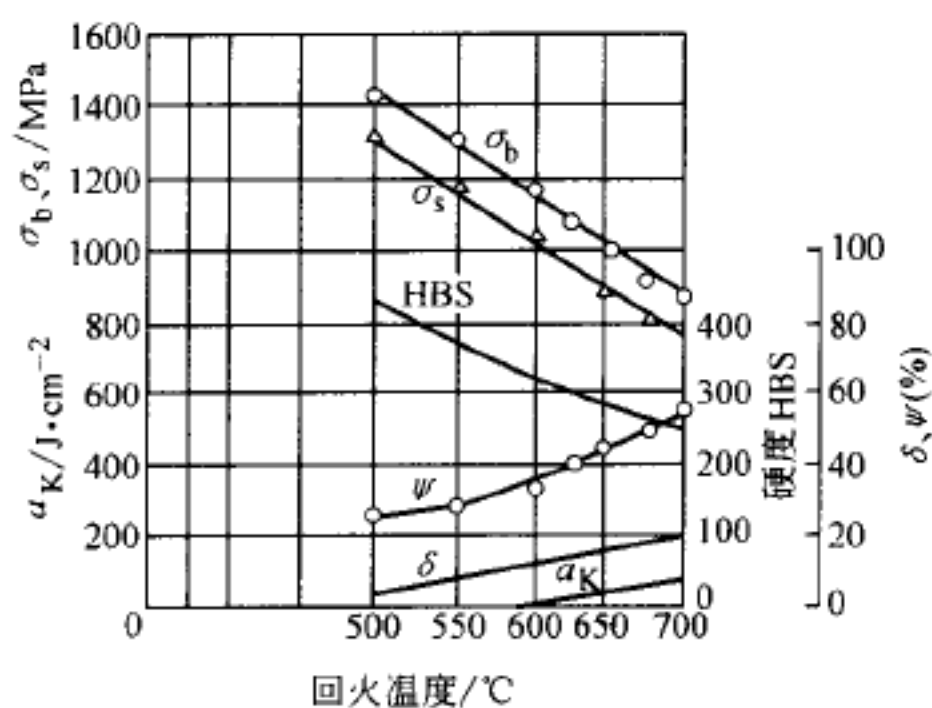


a)

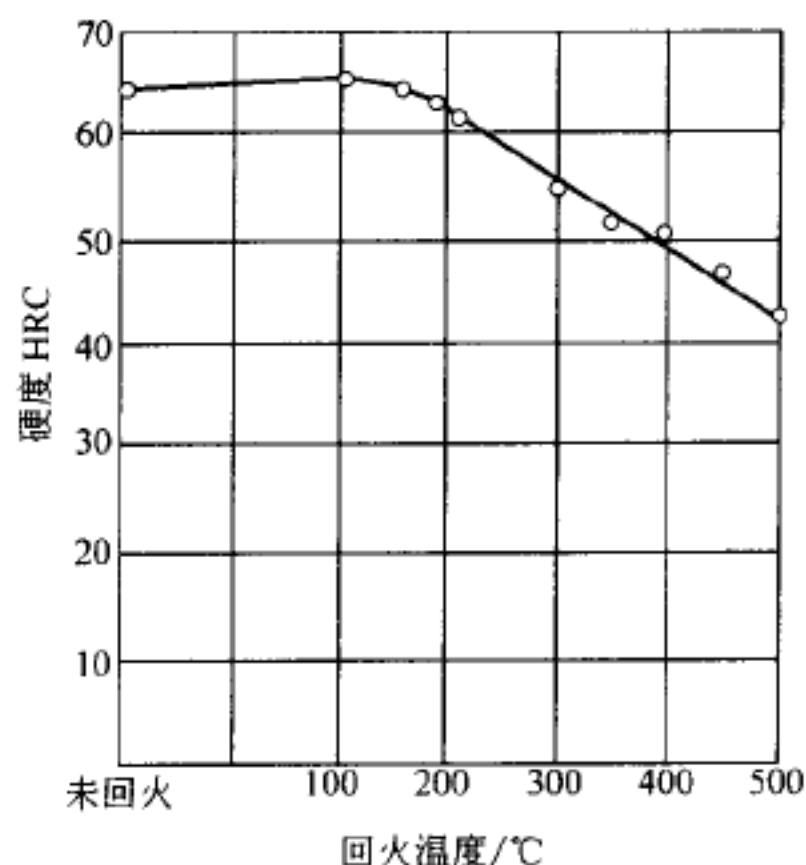


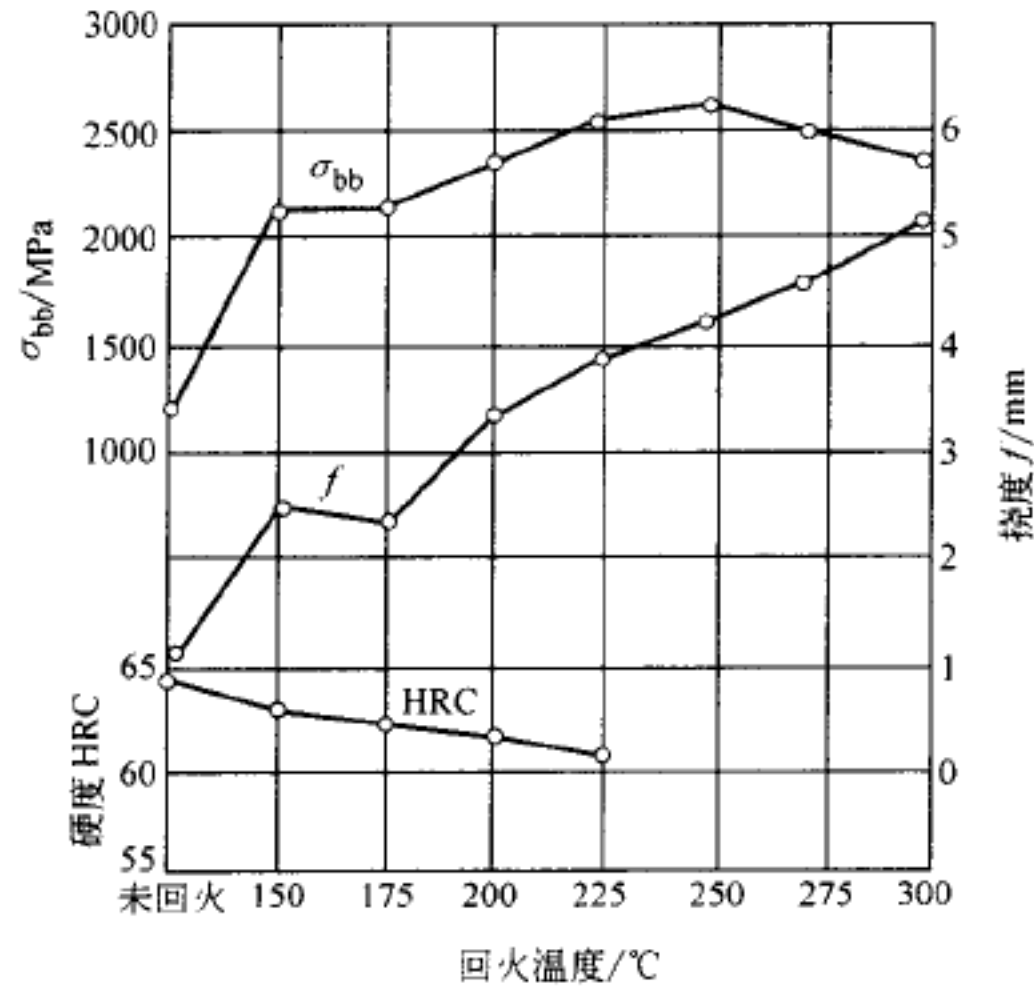
b)

表图 5.4-92 T7、T7A 钢

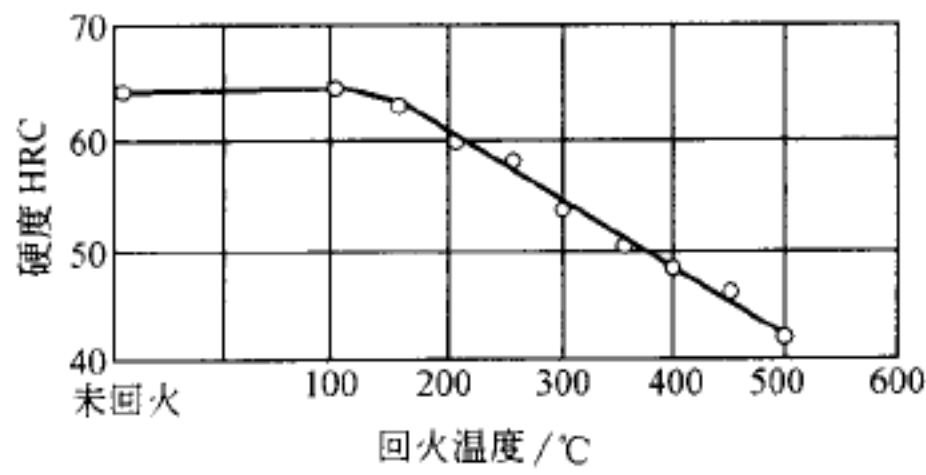
表图 5.4-93 T8、T8A 钢
810℃ 淬火, 回火 1h表图 5.4-94 T8Mn 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.82,
Mn0.84; 845℃ 淬火

表图 5.4-95 T9 钢

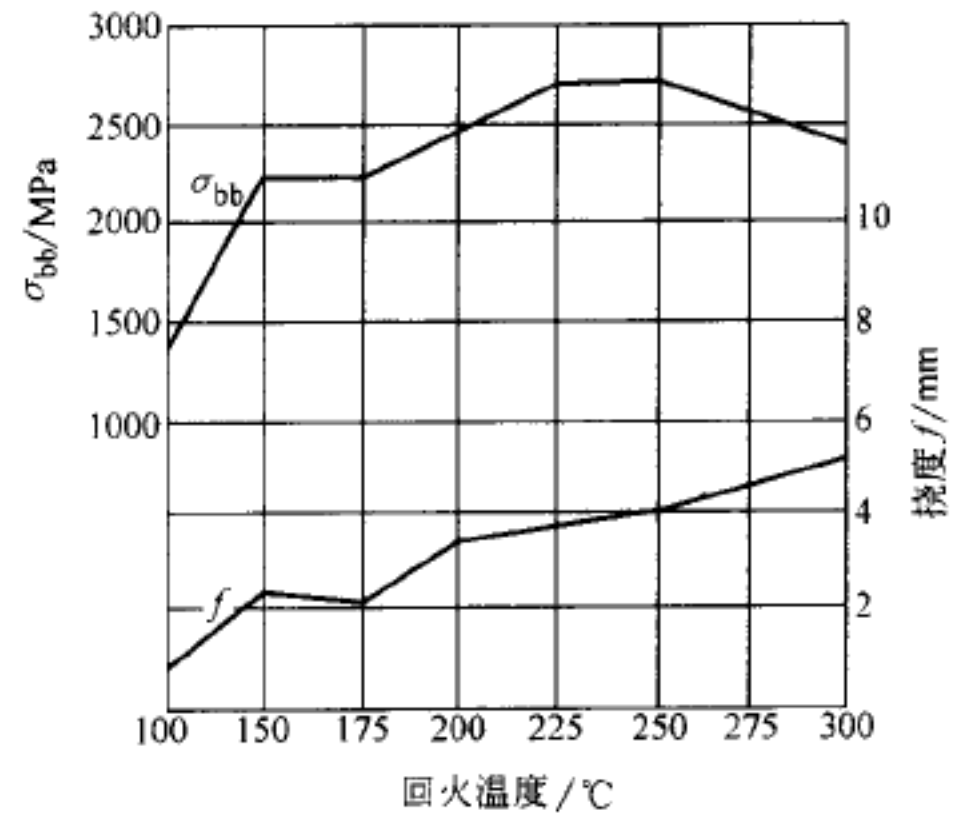
表图 5.4-96 T10、T10A 钢
780℃ 水淬, 回火 1h



表图 5.4-97 T11、T11A 钢
780℃ 水淬、回火 1h

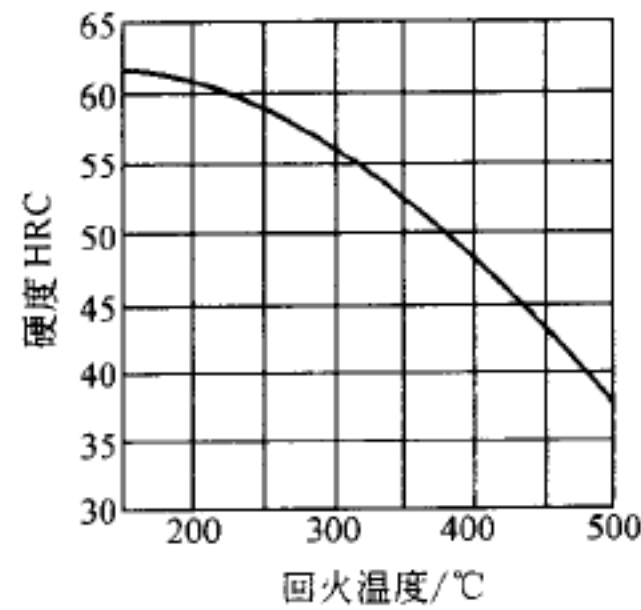


a)

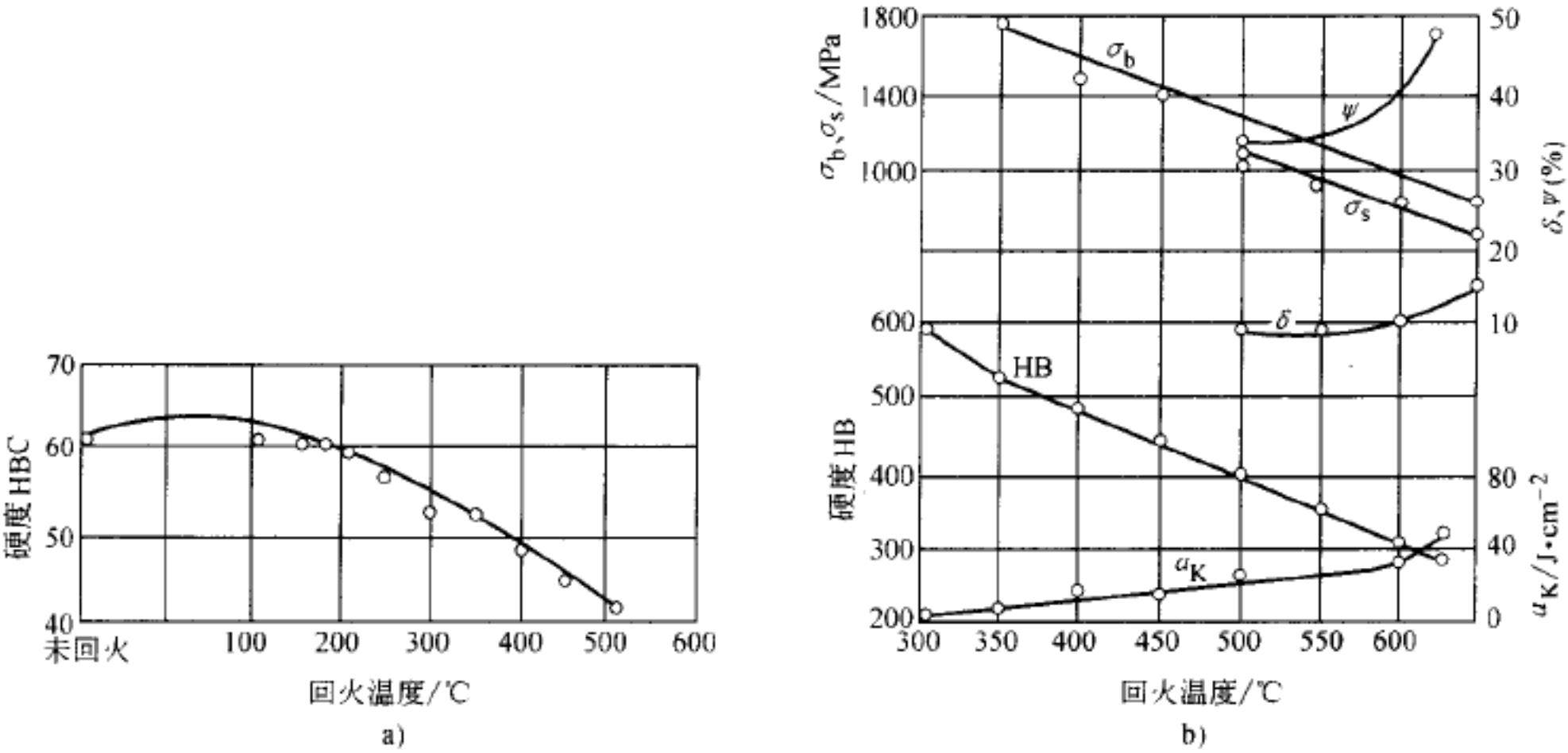


b)

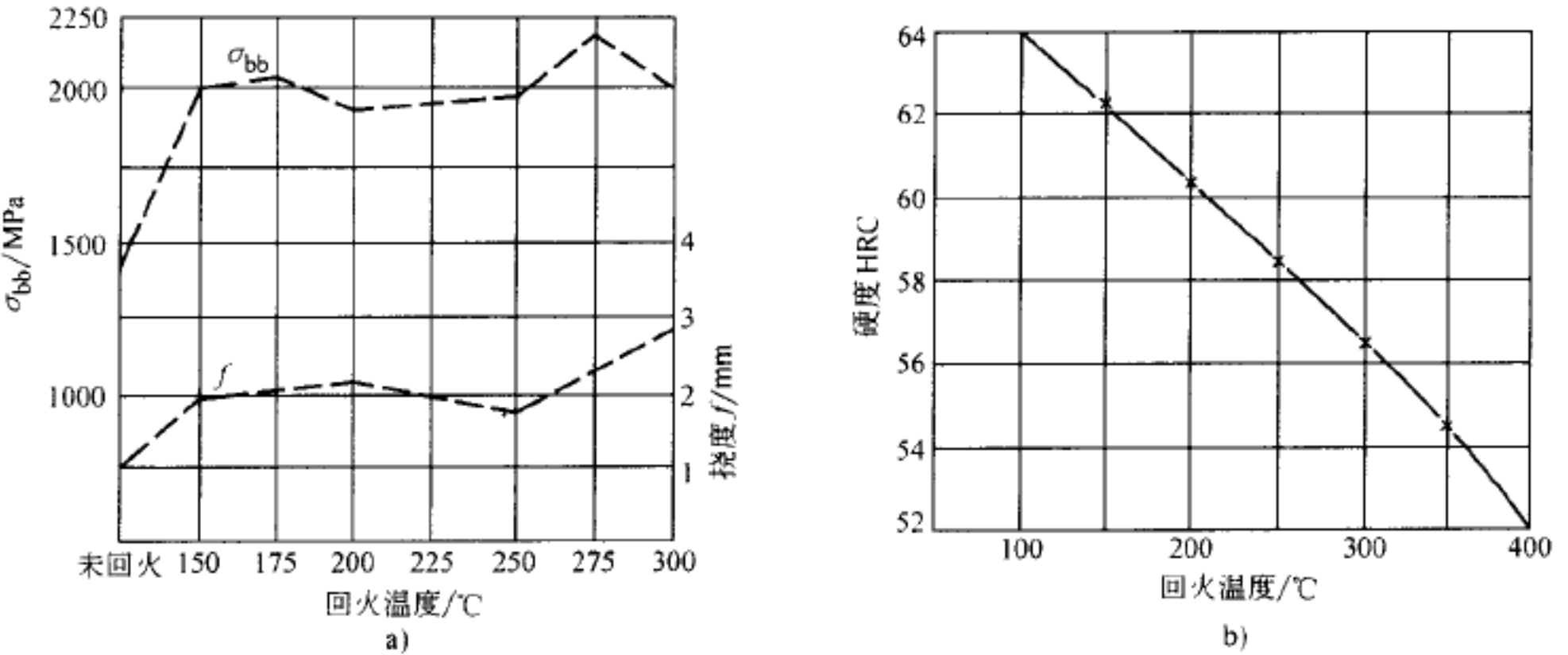
表图 5.4-98 T12、T12A 钢
a) 780℃ 水淬, 回火 1h b) 780℃ 淬火



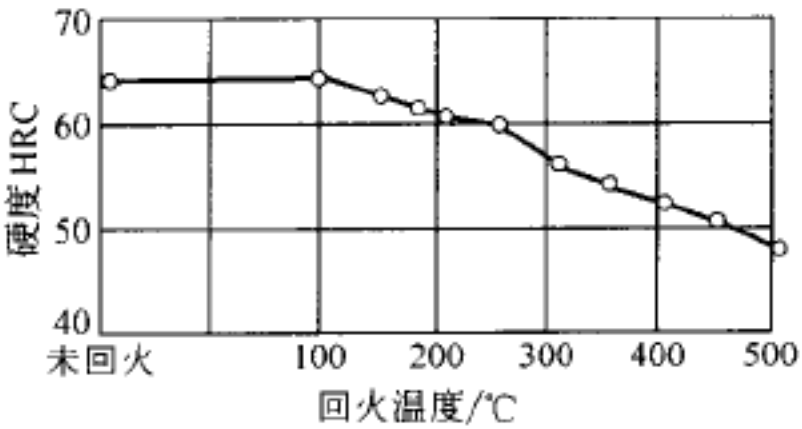
表图 5.4-99 Cr06 钢
化学成分 (质量分数) (%): C1.30 ~ 1.45,
Cr0.50 ~ 0.70, Mn0.20 ~ 0.40, Si ≤ 0.35



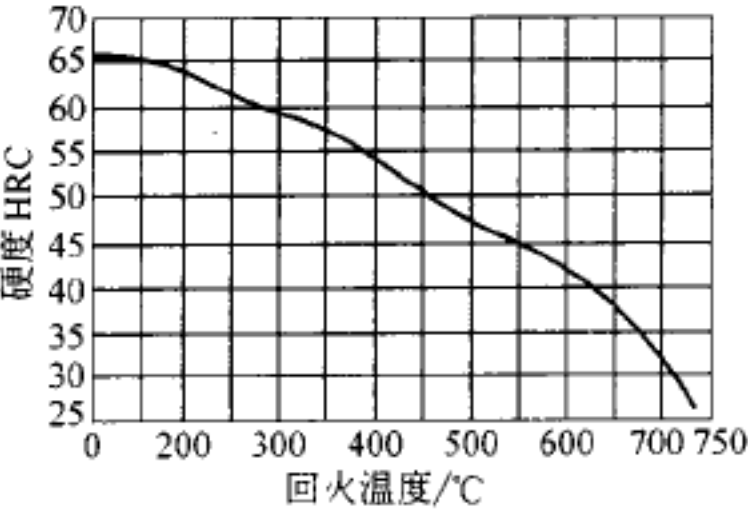
表图 5.4-100 Cr2 钢
840℃油淬，回火 1h，a) 硬度 b) 常见力学性能



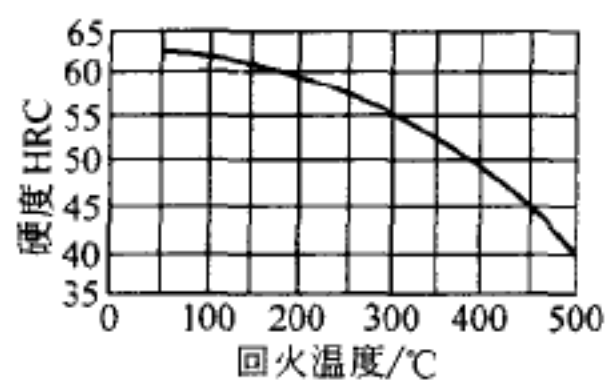
表图 5.4-101 CrMn 钢
加热温度 850℃



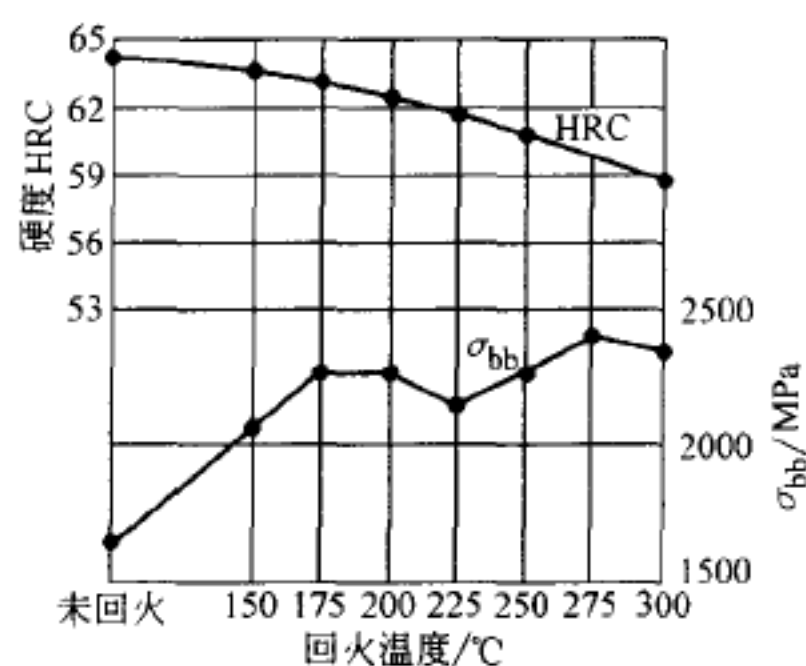
表图 5.4-102 CrWMn 钢
830℃油淬，回火 1h



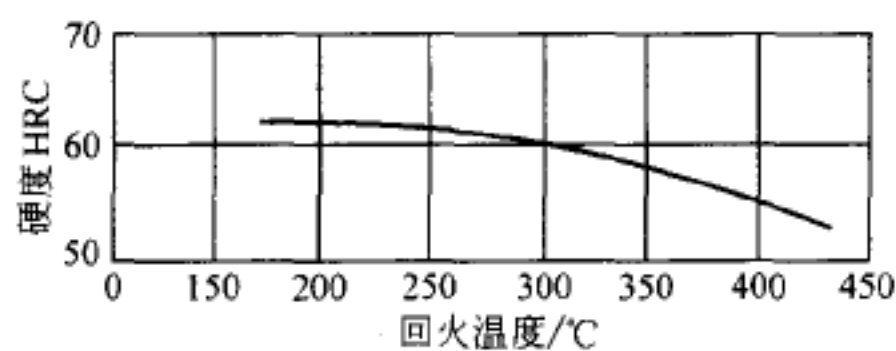
表图 5.4-103 CrW5 钢
800 ~ 820℃水淬



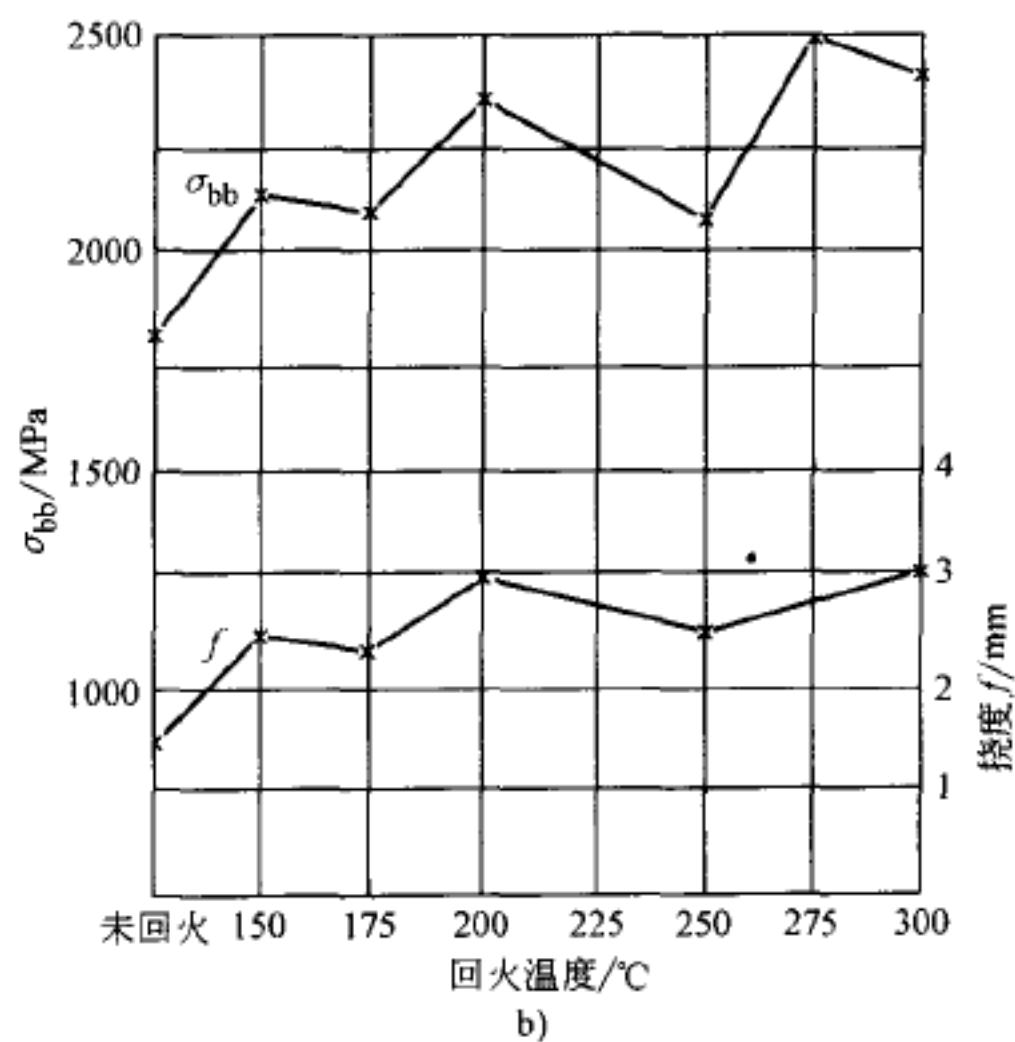
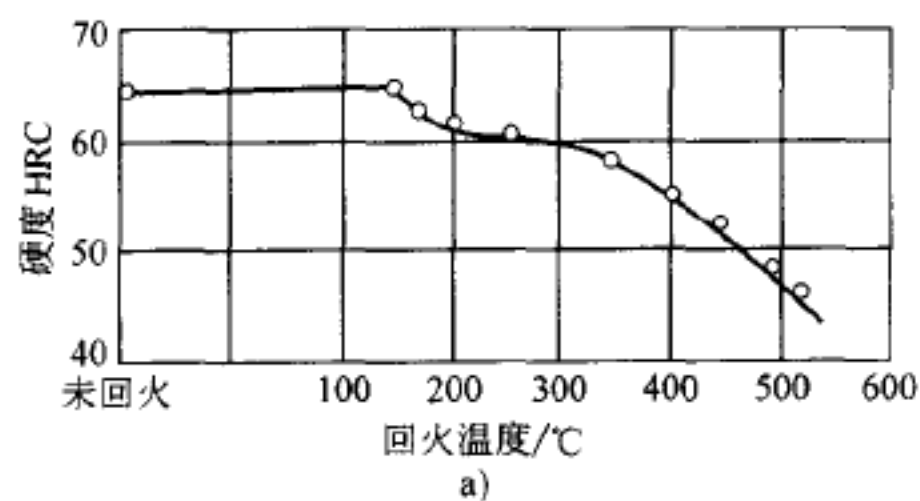
表图 5.4-104 9Cr2 钢
840℃油淬



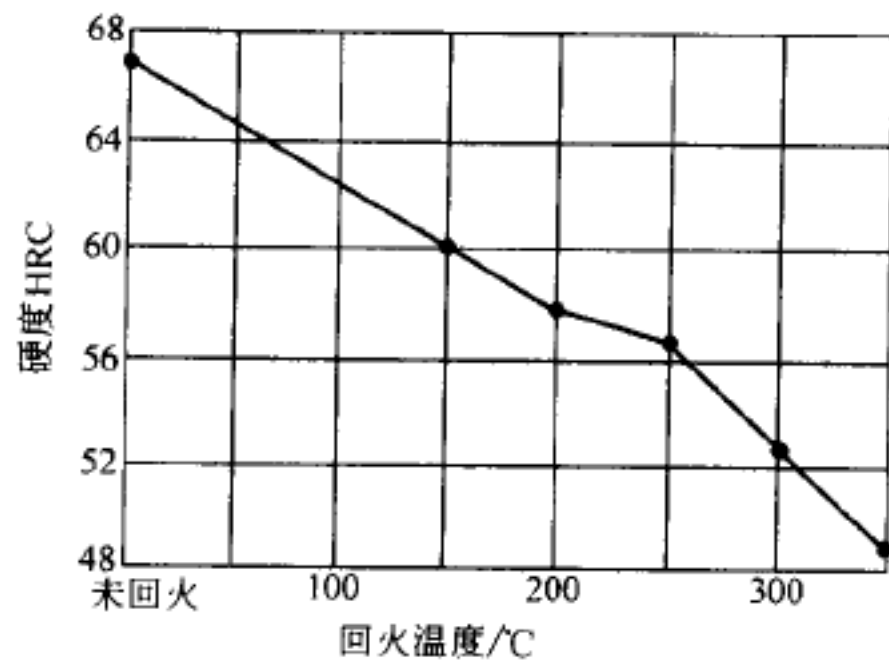
表图 5.4-105 9CrSi 钢
回火 1h



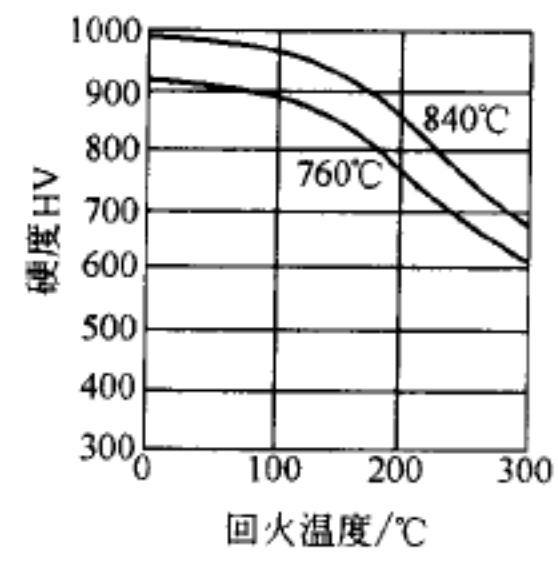
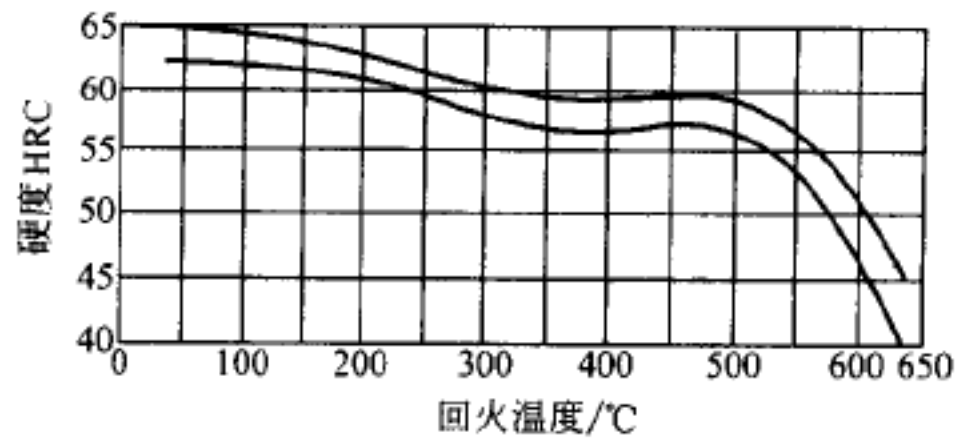
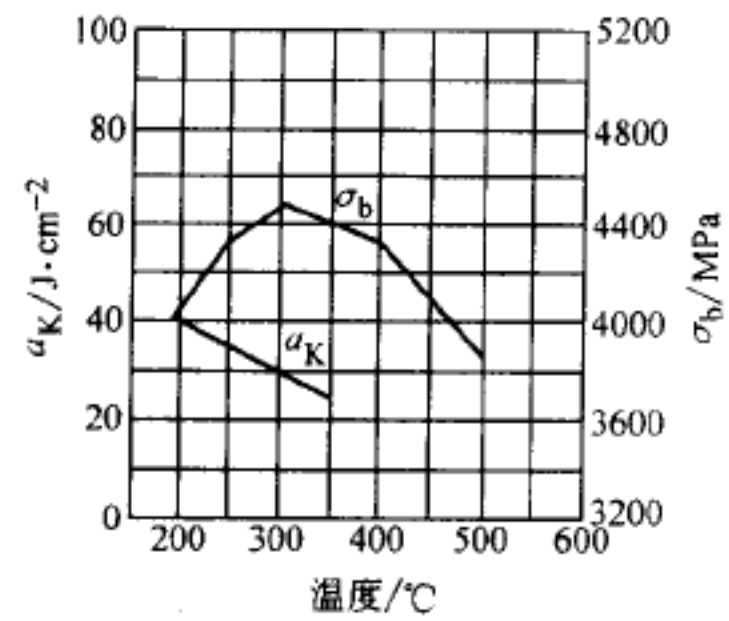
表图 5.4-106 SiCr 钢
860℃油淬



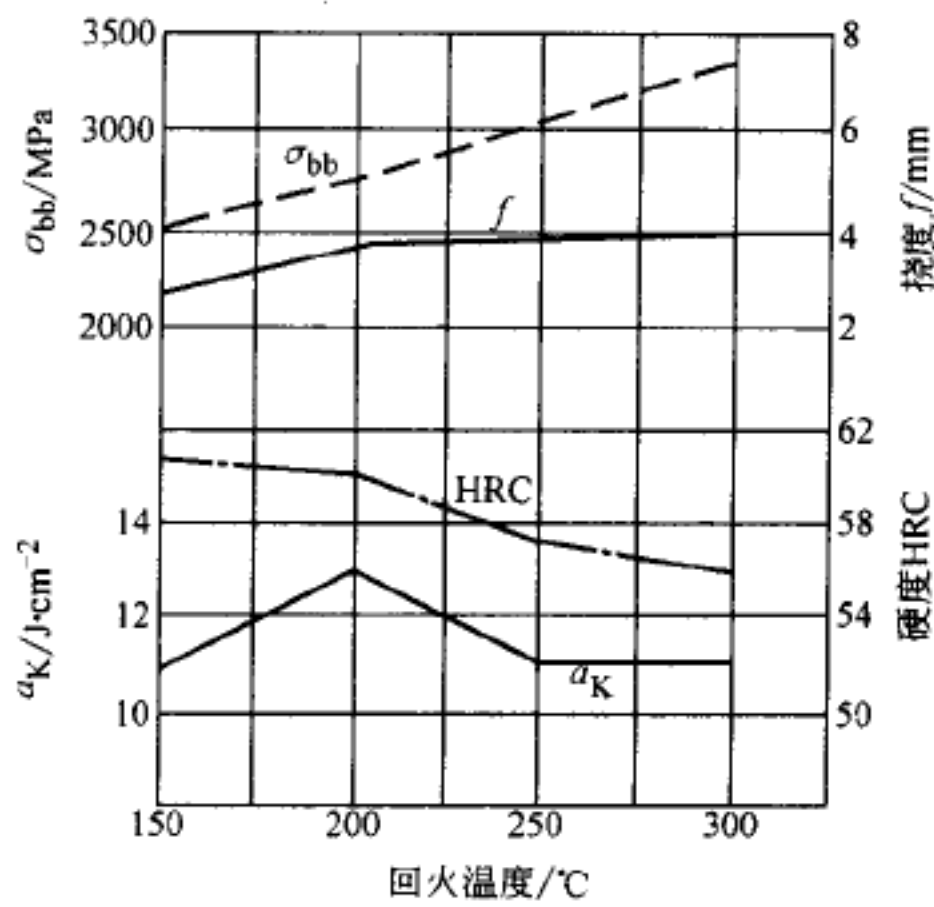
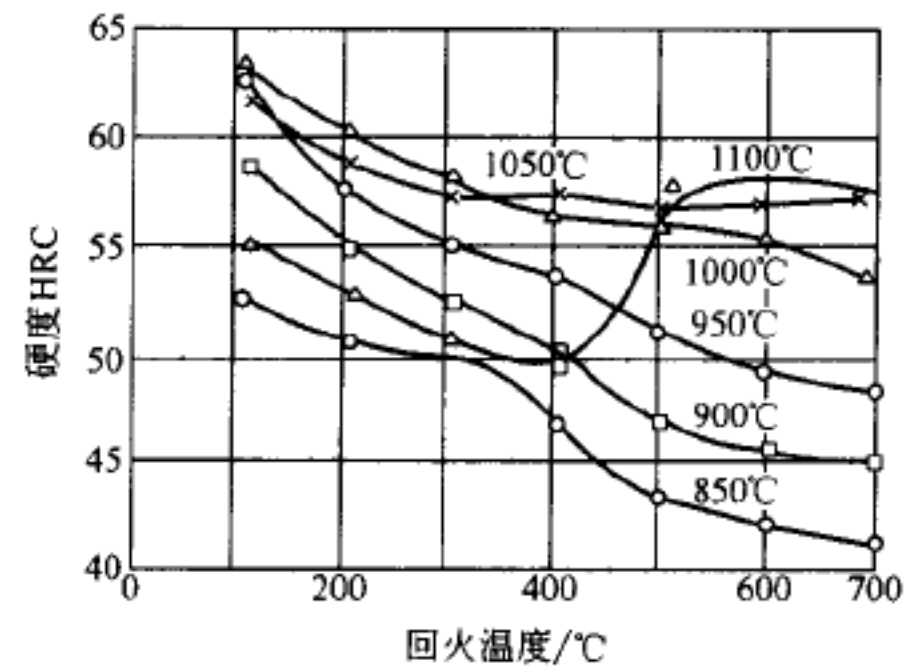
表图 5.4-107 9SiCr 钢
970℃油淬, 回火 1h



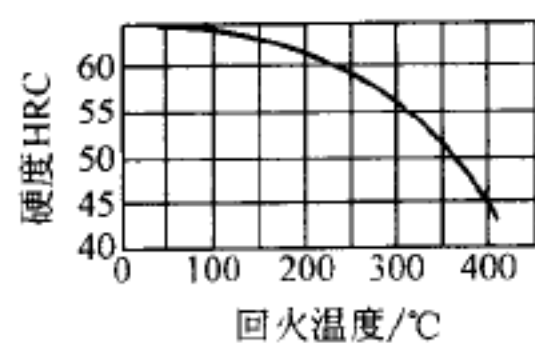
表图 5.4-108 W 钢


 表图 5.4-109 V 钢
840°C 水淬 760°C 水淬

 表图 5.4-110 Cr12 钢
980°C 淬火


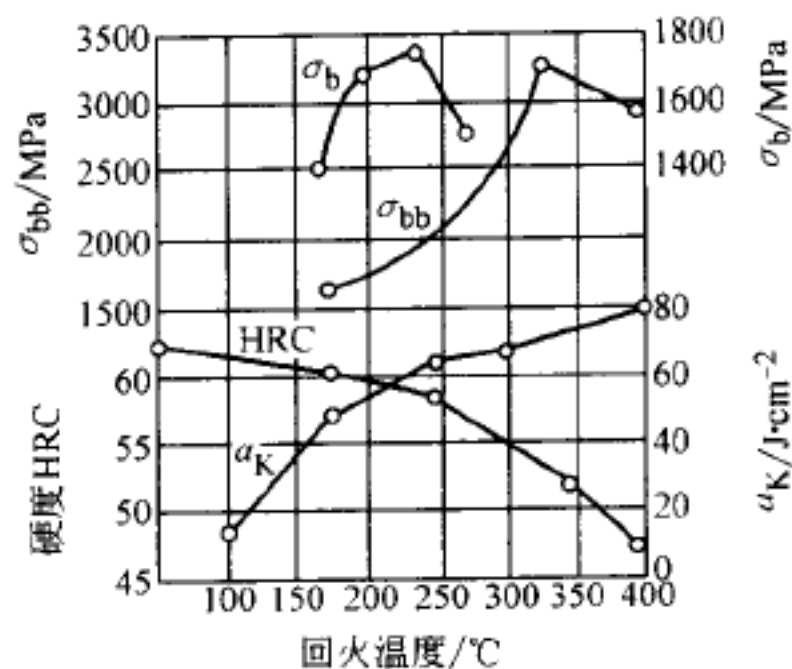
表图 5.4-111 Cr12Mo 钢


 表图 5.4-112 Cr12MoV 钢
1000°C 油淬


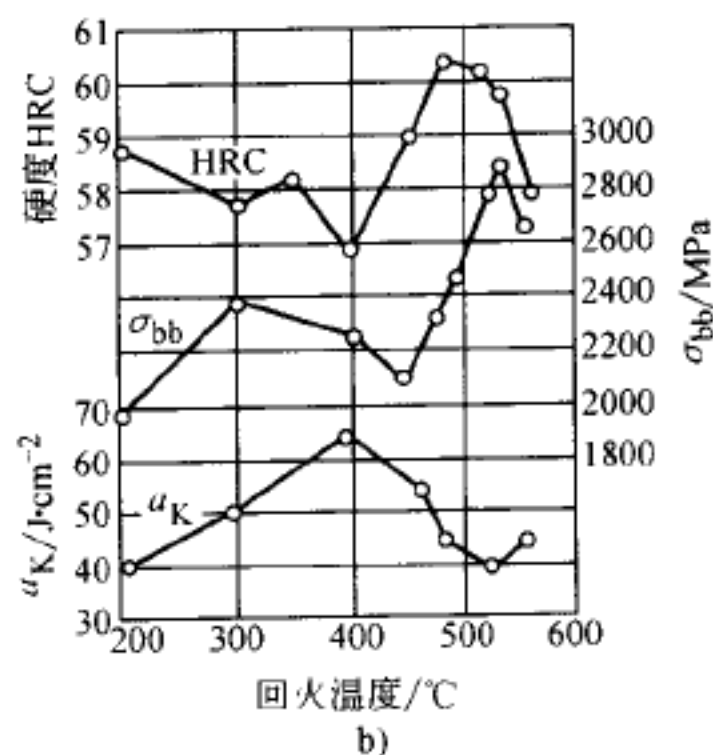
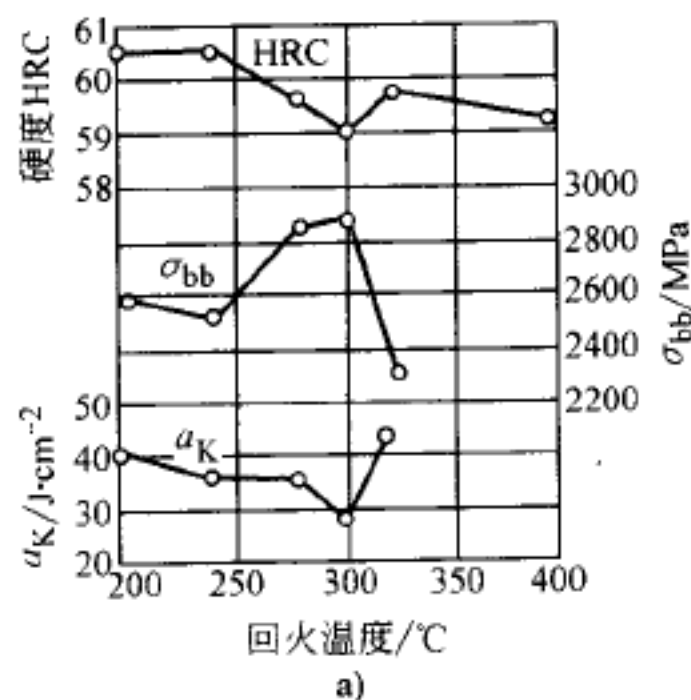
表图 5.4-113 Cr6WV 钢



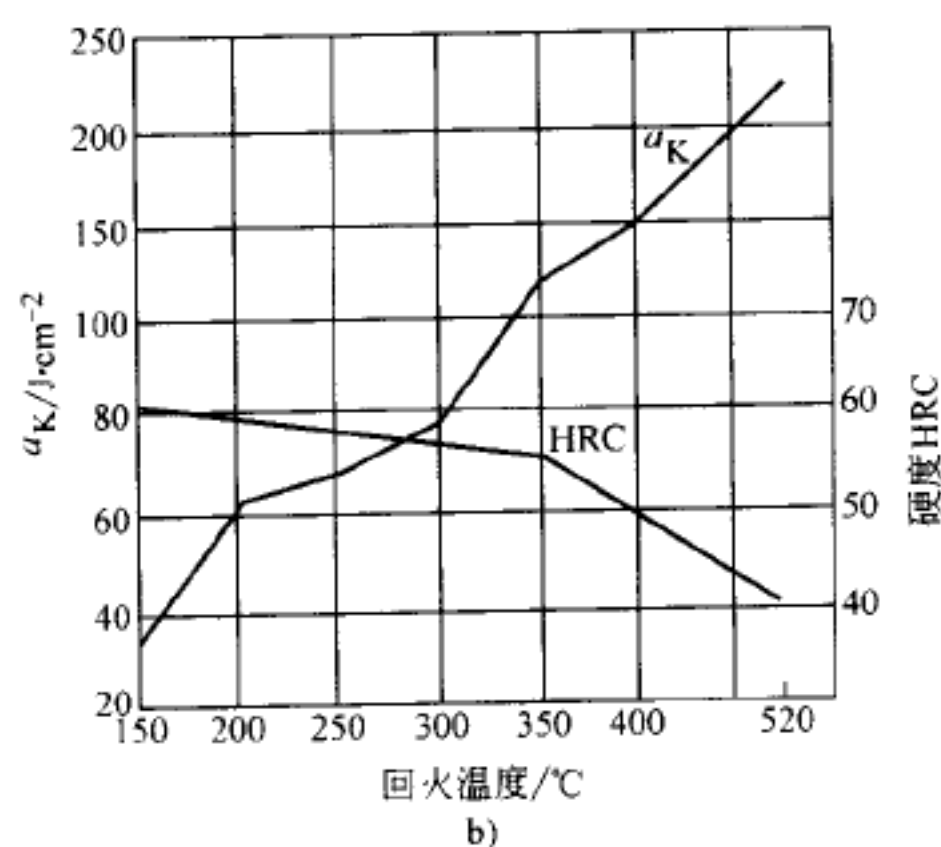
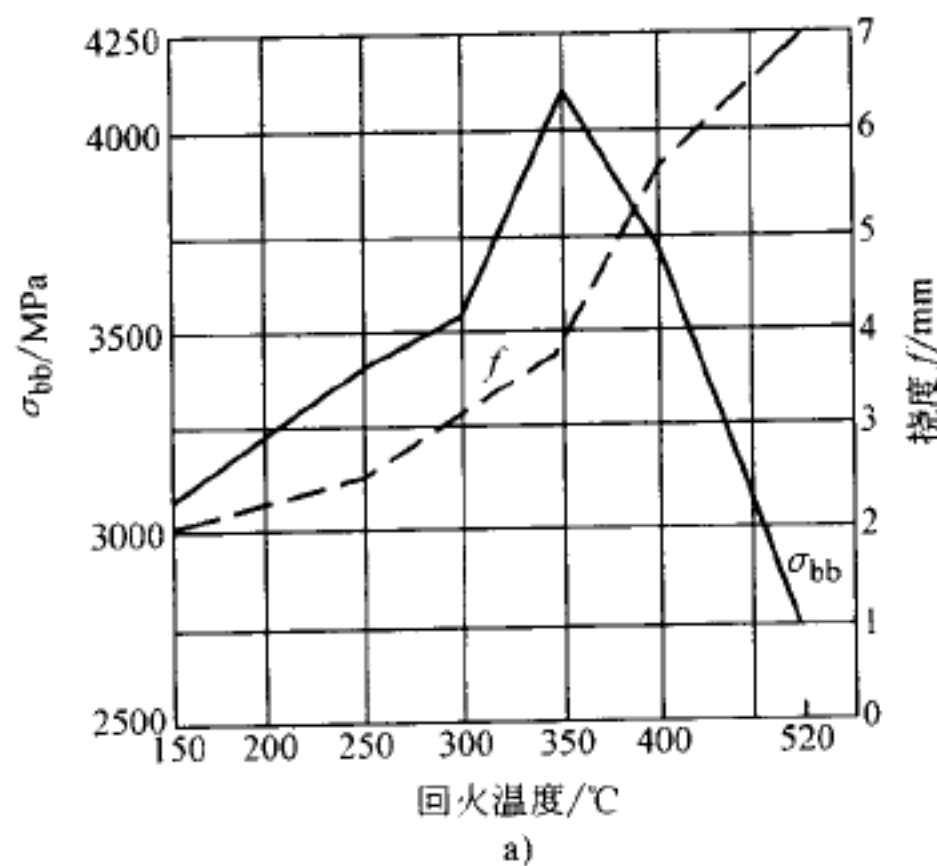
表图 5.4-114 9Mn2 钢
760 ~ 780°C 水淬



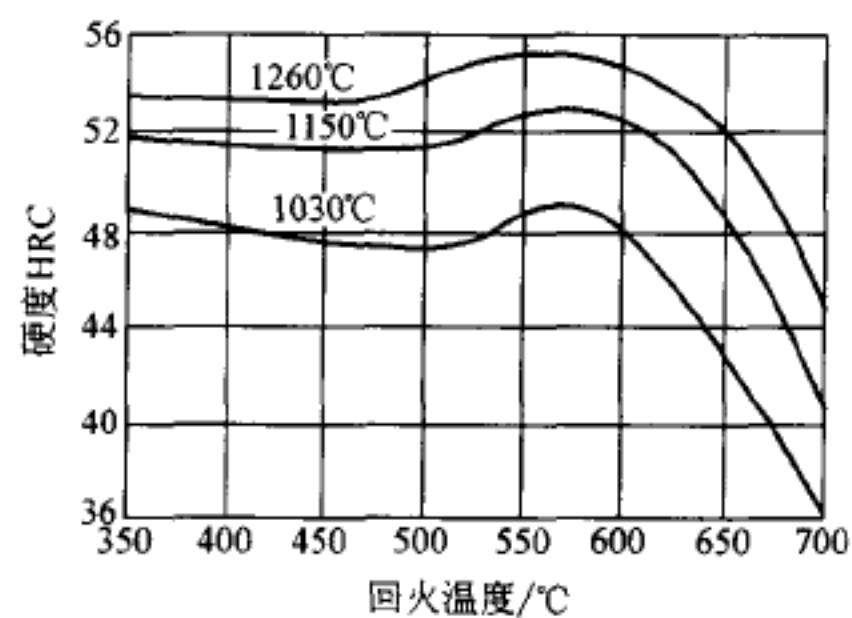
表图 5.4-115 9Mn2V 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.91,
Mn1.87, Si0.37, V0.18



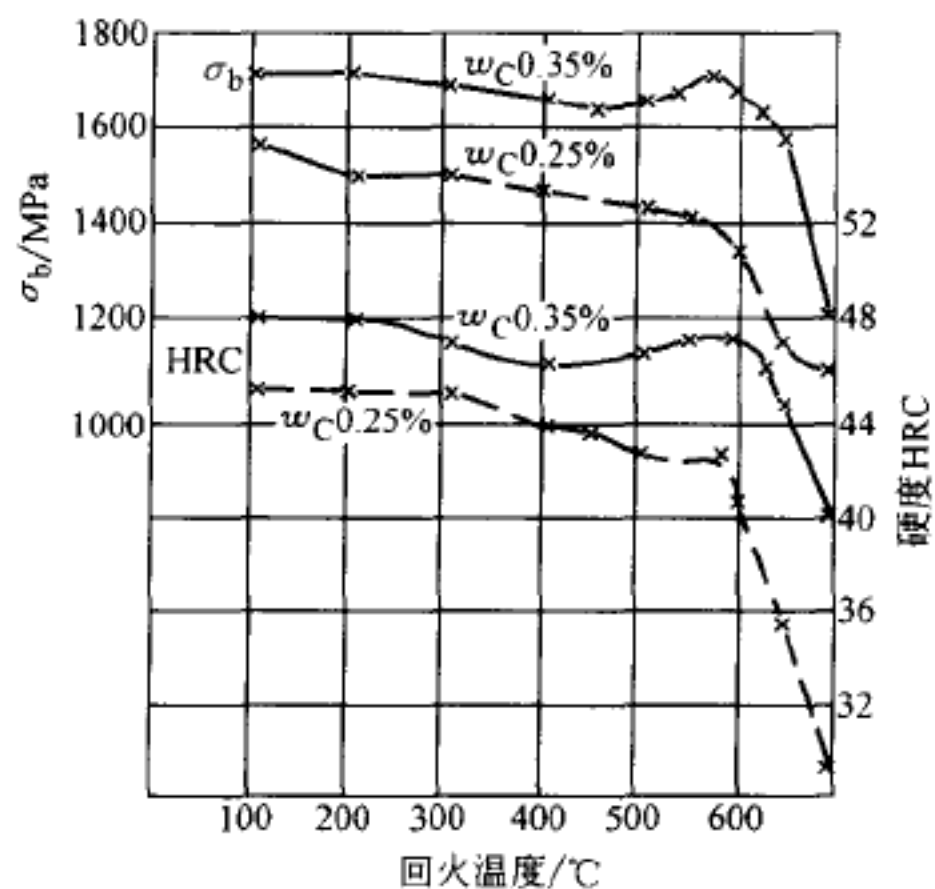
表图 5.4-116 Cr4W2MoV 钢
a)、b) 960°C 淬火



表图 5.4-117 SiMn 钢
800°C 淬火



a)



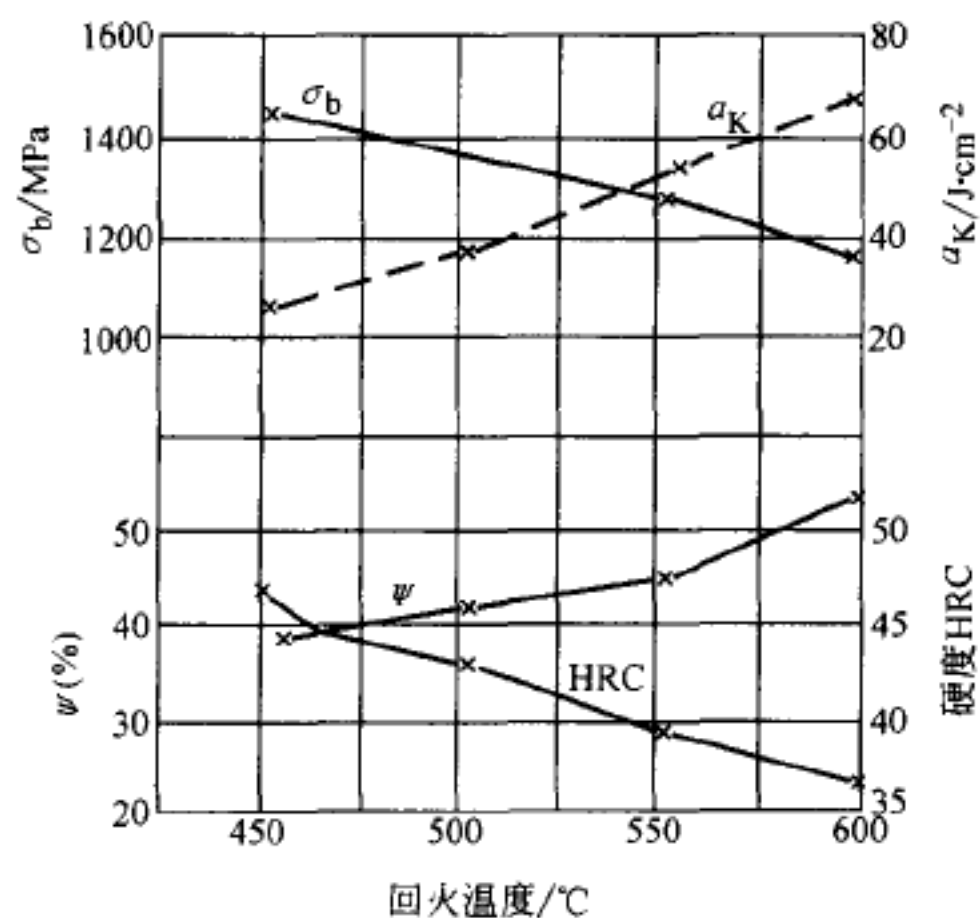
b)

表图 5.4-118 3Cr2W8V 钢

化学成分 (质量分数) (%): C a) 0.3, b) 0.25、0.35; Cr a) 3.2, b) 相同;

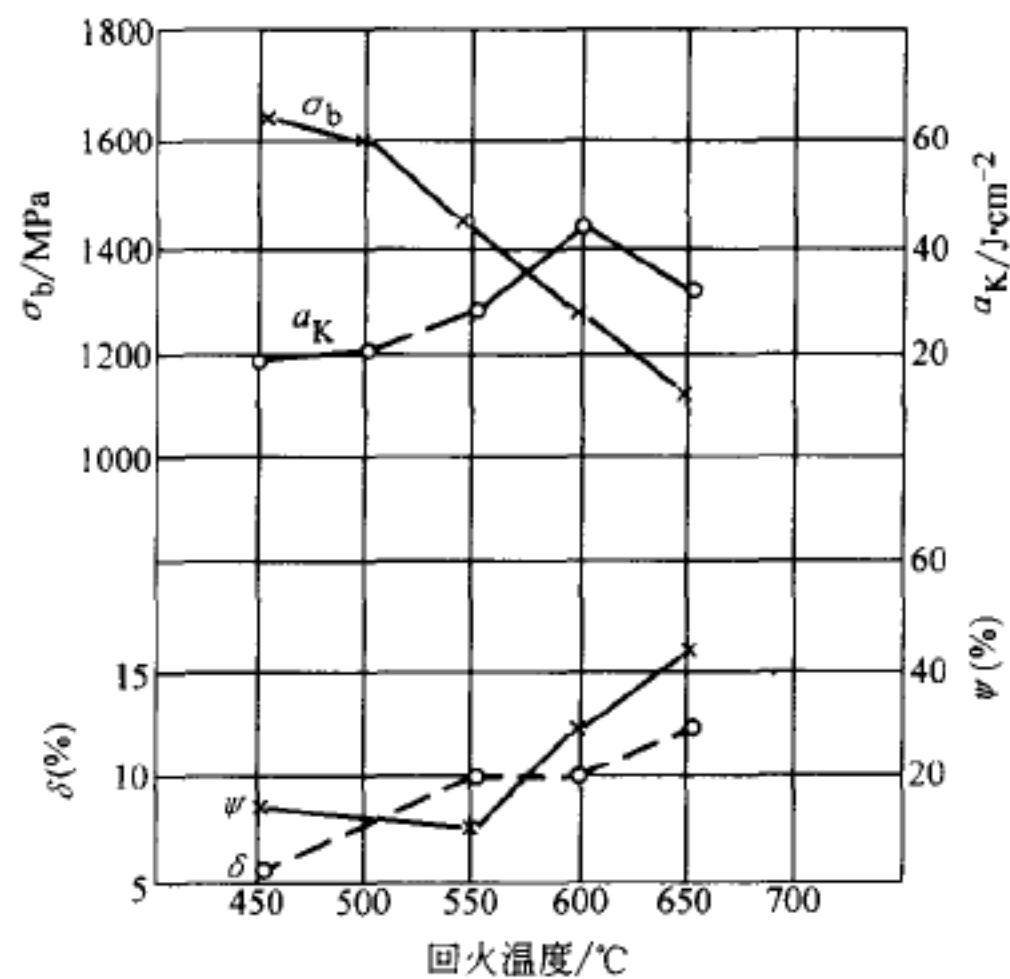
W a) 10.00, b) 相同; V a) 0.40, b) 相同;

热处理 a) 1260°C, b) 1150°C 油淬, a) 1030°C, b) 1100°C 淬火



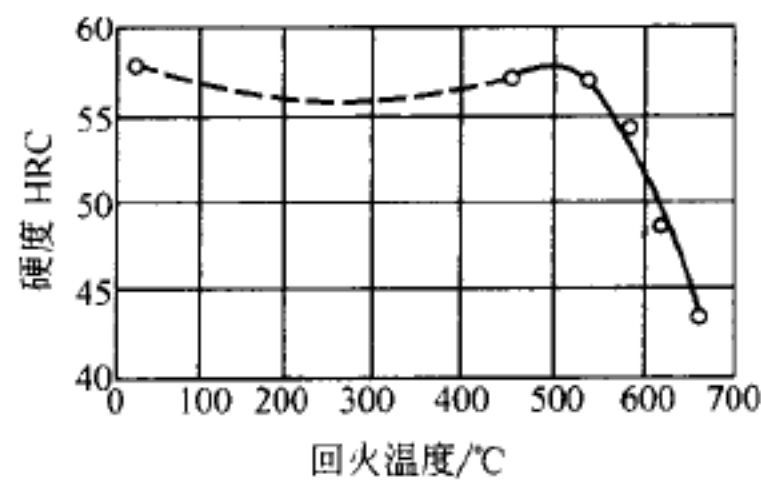
表图 5.4-119 5CrNiMo 钢

840°C 淬火

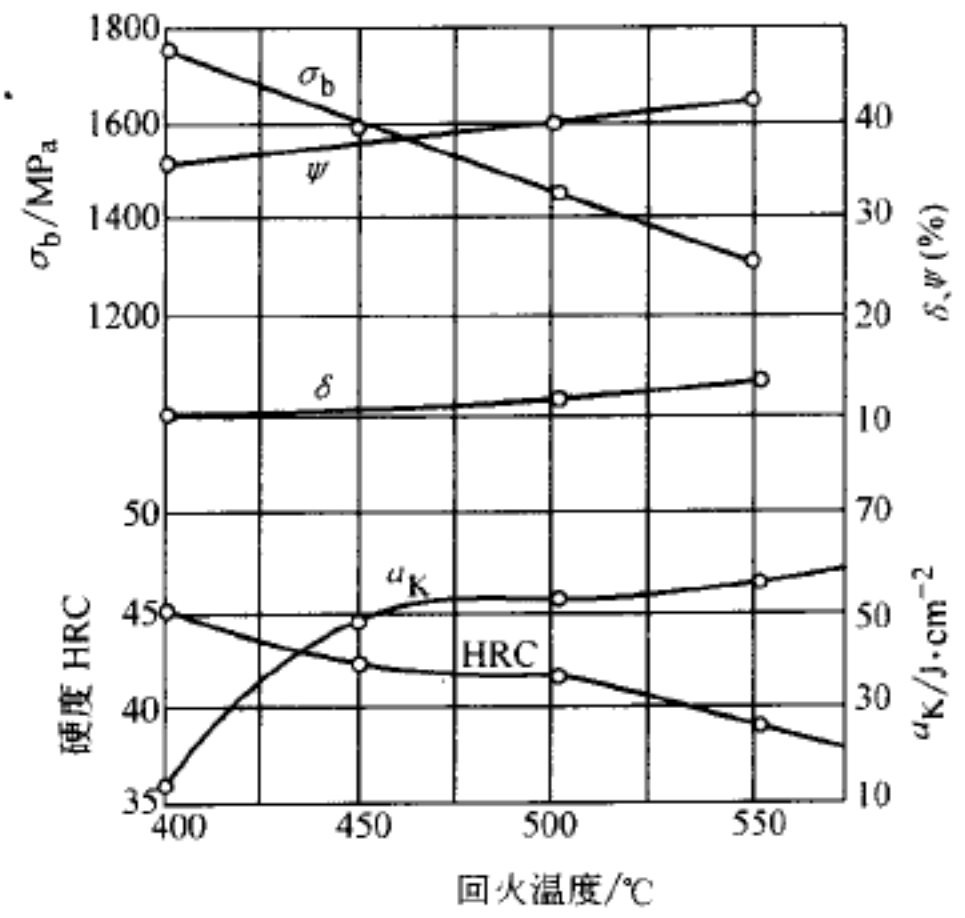


表图 5.4-120 5CrMnMo 钢

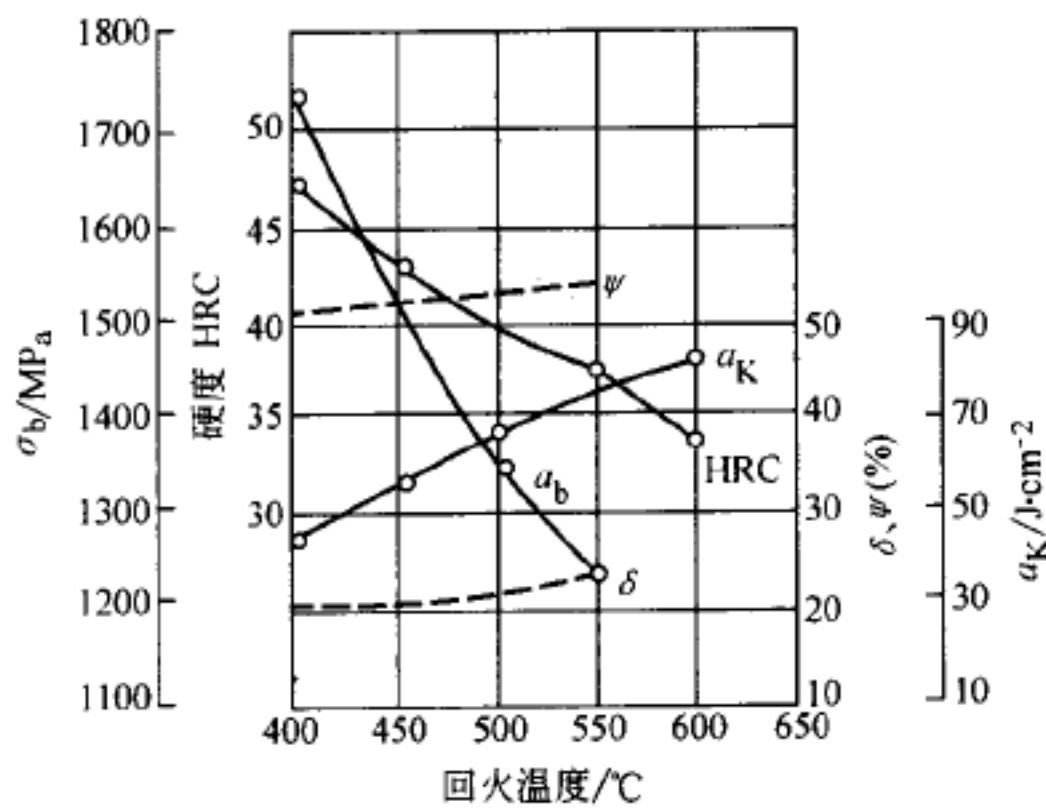
850°C 油淬



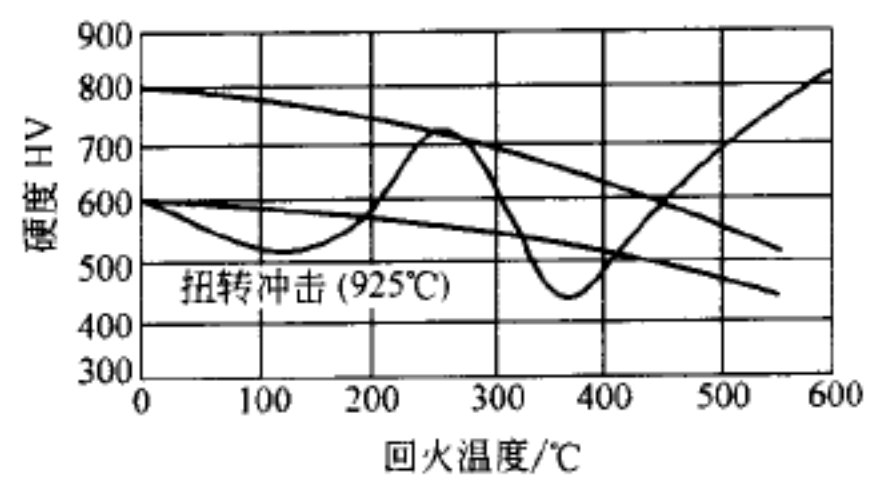
表图 5.4-121 4Cr5W2SiV 钢
1080℃空冷淬火



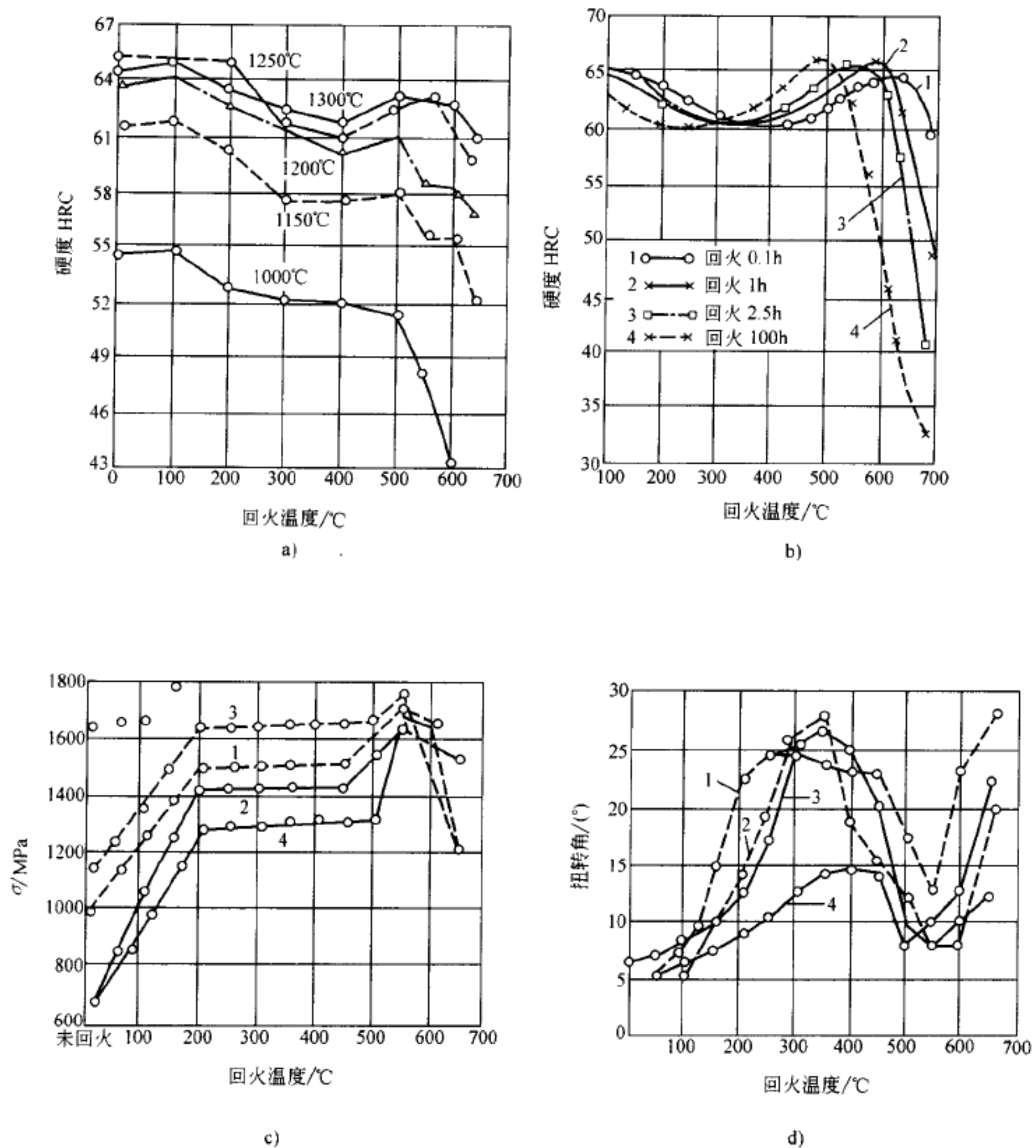
表图 5.4-122 5SiMnMoV 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.57, Si1.00,
Mn0.95, Mo0.12, V0.16, S0.018,
P0.002; 860℃淬火



表图 5.4-123 6SiMnV 钢
化学成分 (质量分数) (%): C0.57, Mn0.96,
Si0.95, V0.16, S0.013, P0.004

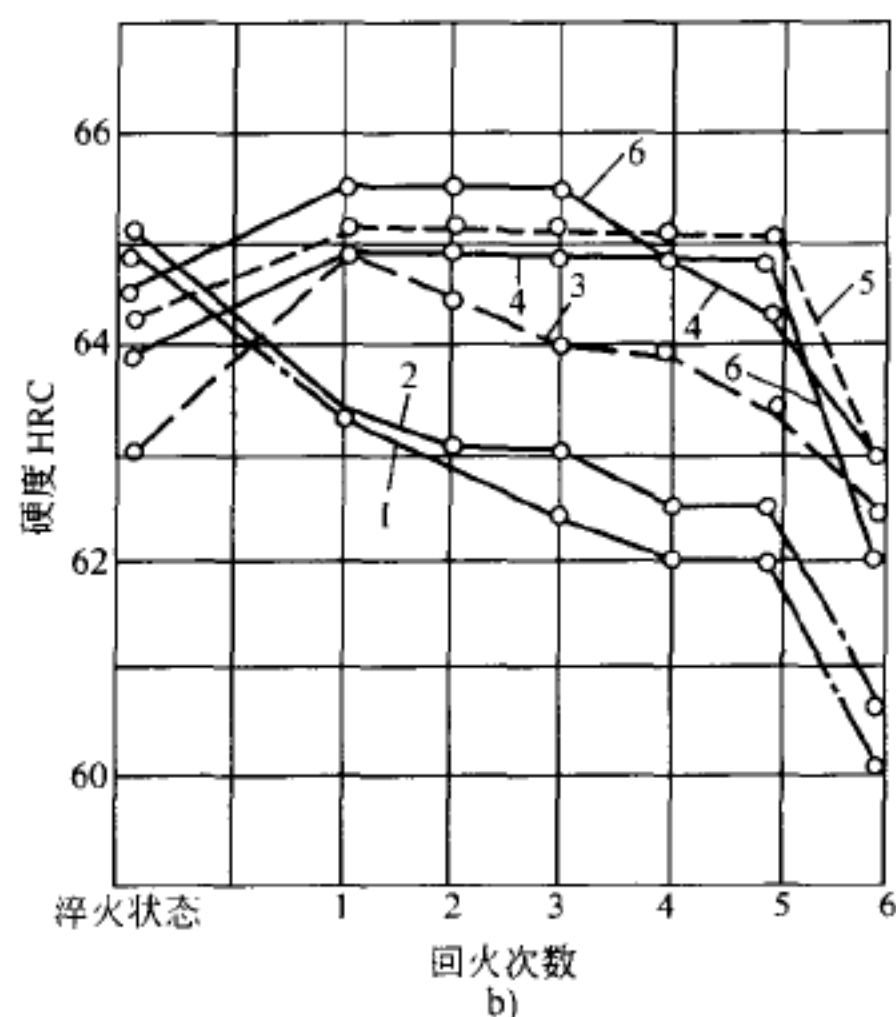
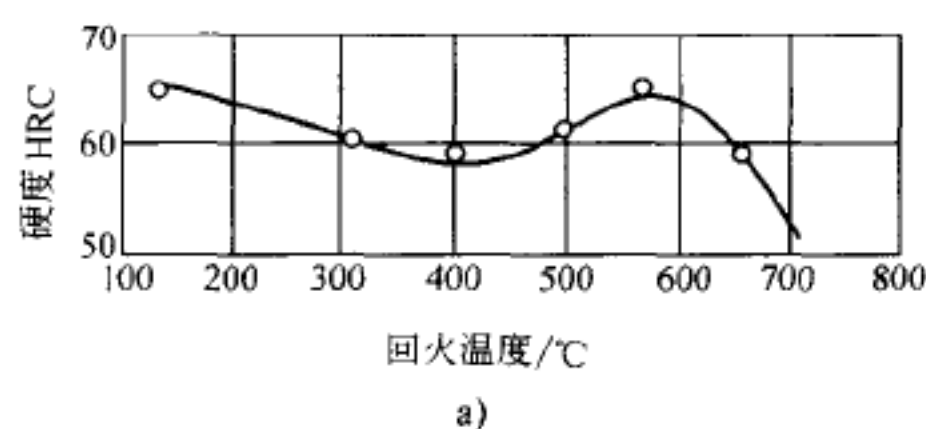


表图 5.4-124 5W2CrSiV 钢
900 ~ 925℃油淬



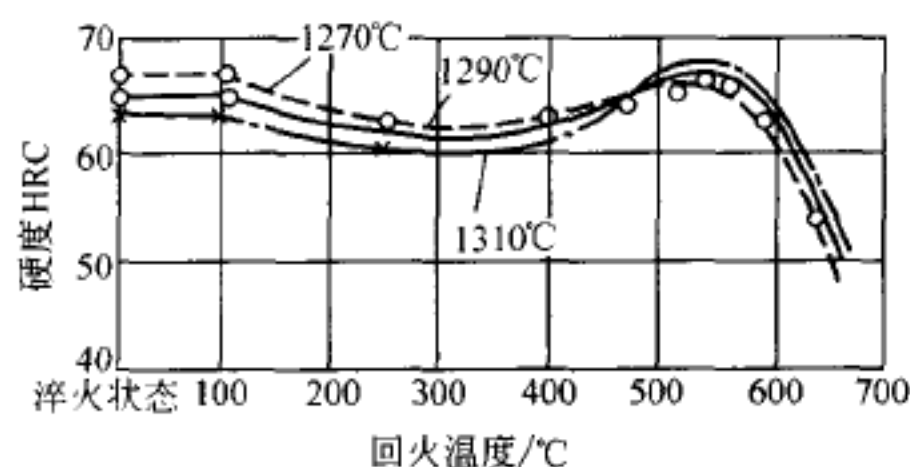
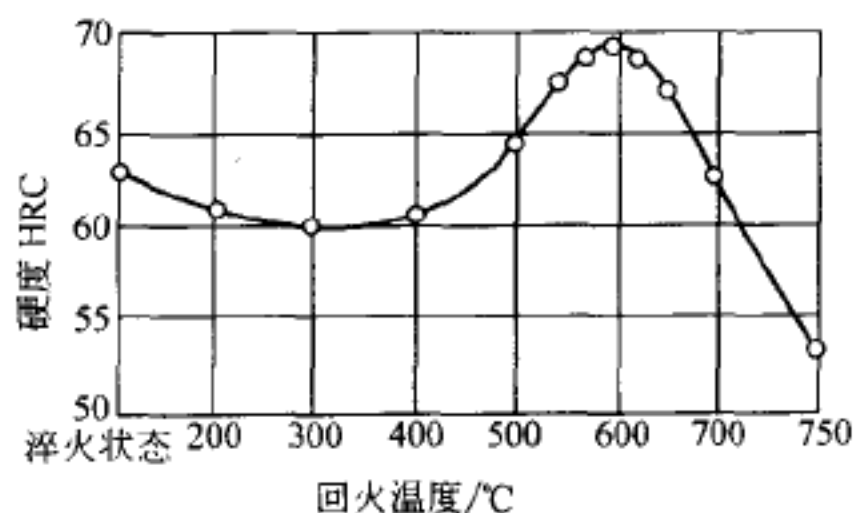
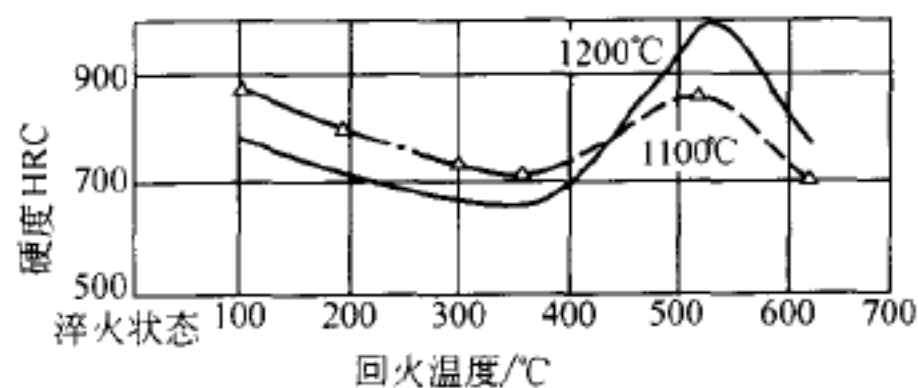
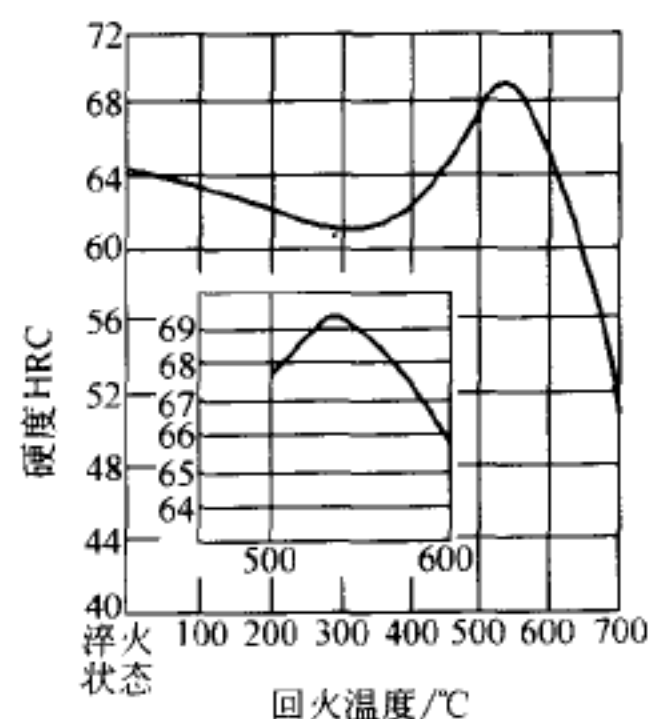
表图 5.4-125 W18Cr4V 钢

a) 不同淬火温度，一次回火 b) 不同回火时间 c) 1—1260°C 淬火，
-78°C 冷处理 2—1260°C 淬火，3—1300°C 淬火，-78°C 冷处理 4—1300°C 淬火
d) 1—1260°C 淬火，-78°C 冷处理 2—1260°C 淬火，3—1300°C 淬火，
-78°C 冷处理 4—1300°C 淬火



表图 5.4-126 W9Cr4V2 钢

淬火温度: 1—1200℃, 2—1220℃, 3—1240℃, 4—1260℃,
5—1280℃, 6—1300℃; 550℃回火, 每次 1h

表图 5.4-127 W6Mo5Cr4V2 钢
不同淬火温度表图 5.4-128 W6Mo5Cr4V2Al 钢
1235℃淬火表图 5.4-129 W2Mo10Cr4VCo8 (M4) 钢
不同温度淬火, 三次回火, 每次 2h表图 5.4-130 W12Mo3Cr4V3Co5Si 钢
1220~1240℃淬火, 回火 3~4 次

第 6 章 金属的加热和冷却

6.1 加热方式 (表 6-1)

表 6-1 金属热处理时的加热方式和适用范围

加热方式		加热时间比较	氧化	脱碳	畸变	加热条件和适用范围
种类	介质					
炉中加热	空气	1	++	++	++	一般铸锻毛坯的退火、正火
	盐浴	0.3	-	-	+	加工半成品件的加热淬火, 多用于工模具
	铅浴	0.2	-	-	+	同上, 过去多用于枪械零件, 现很少用
	流态床	0.5	-	-	+	启动快、节能、可替代盐炉
	真空	2	--	--	-	工模具的热处理可取代盐炉
	可控气	1.2	-	-	+	批量生产的渗碳淬火
火焰	还原性	0.5	+	+	-	火焰调至微还原性, 可基本无氧化脱碳, 用于形状复杂件表面淬火
感应	空气	0.1	+	+	-	用于钢件表面淬火, 按淬硬层要求可选高频、超音频、中频、工频等电源
电阻	空气	0.2	+	+	+	用于金属棒料、长管件的直接通电加热
激光	空气	0.1	+	+	-	用于高密度能冲击加热表面淬火、表面合金化、熔化凝固
电子束	真空	0.1	-	-	-	用于高密度能冲击加热表面淬火、表面合金化、熔化凝固
离子束	真空	0.2	-	-	-	用于离子轰击表面化学热处理

6.2 加热计算

1. 加热计算公式 (表 6-2 和表 6-3)

表 6-2 加热计算的经验公式, 碳钢和合金钢的加热系数

加热时间的经验计算式	$t = \alpha \cdot K \cdot D$ t —加热时间 (min 或 s) α —加热系数 (min/mm 或 s/mm) D —工件有效厚度 (mm) ^① K —装炉条件修正系数, 通常取 1~1.5	
钢 材	加热系数 $\alpha/\text{min} \cdot \text{mm}^{-1}$	
	空气电阻炉/ $\text{min} \cdot \text{mm}^{-1}$	盐浴炉/ $\text{s} \cdot \text{mm}^{-1}$
碳钢	0.9~1.1	25~30
合金钢	1.3~1.6	50~60
高速钢		15~20 (一次预热)
		8~15 (二次预热)

① 当高度 (h) /壁厚 (δ) ≤ 1.5 时, 以 h 计; 当 $h/\delta \geq 1.5$ 时, 以 1.5δ 计; 当 $h/\delta > 7$ 时, 以实心圆柱计; 空心内圆锥体件以外径 $d \times 0.8$ 计。

表 6-3 工模具钢在不同介质中的加热时间

钢 种	盐 浴 炉		空气炉、可控气氛炉
高速钢	直径 d/mm	加热时间/s	—
	< 8	96 (850~900℃ 预热)	
	8~20	80~200	
	20~50	160~400	
	50~70	350~490	
	70~100	420~600	
	> 100	500	

(续)

钢 种	盐 浴 炉		空气炉、可控气氛炉
热 锻 模具钢	直径 d/mm	加热时间/ min	
	5	5 ~ 8	厚度 < 100mm, 20 ~ 30min/25mm
	10	8 ~ 10 (800 ~ 850℃ 预热)	> 100mm, 10 ~ 20min/25mm
	20	10 ~ 15	
	30	15 ~ 20	
	50	20 ~ 25	(800 ~ 850℃ 预热)
	100	30 ~ 40	
冷变形 模具钢	5	5 ~ 8min	厚度 < 100mm, 20 ~ 30min/25mm
	10	8 ~ 10 (800 ~ 850℃ 预热)	> 100mm, 10 ~ 20min/25mm
	20	10 ~ 15	
	30	15 ~ 20	
	50	20 ~ 25	(800 ~ 850℃ 预热)
	100	30 ~ 40	
碳 素 工具钢 合 金 工具钢	10	5 ~ 8min	厚度 < 100mm, 20 ~ 30min/25mm
	20	8 ~ 10 (500 ~ 550℃ 预热)	厚度 > 100mm, 10 ~ 20min/25mm
	30	10 ~ 15	(500 ~ 550℃ 预热)
	50	20 ~ 25	
	100	30 ~ 40	

2. 加热时间的节能计算法 (表 6-4 ~ 表 6-8 和图 6-1)

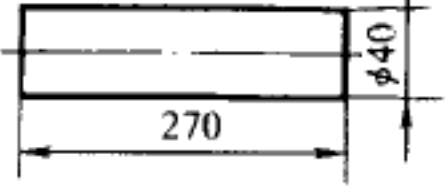
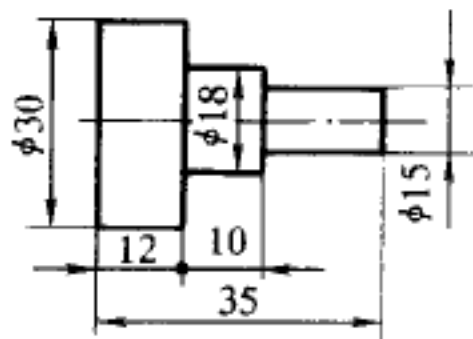
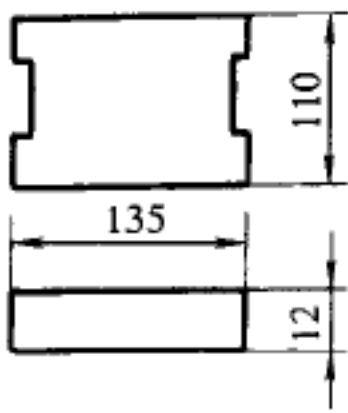
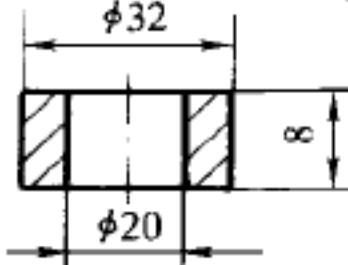
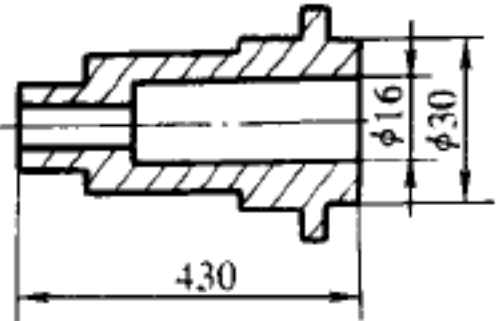
表 6-4 加热时间的节能计算式和炉中加热钢件的 K 值

加热时间 $t_{\text{加}}$ 的计算式	1. $t_{\text{加}} = K' \cdot W + t_{\text{保}}$ K' —综合考虑各种物理因素 (工件形状、加热介质, 工件表面状态, 尺寸等) 的系数 W —工件几何因子, $W = \frac{V}{A}$, V —工件体积, A —工件表面积 $t_{\text{保}}$ —加热到温后的保持时间 (min 或 s) 2. $t_{\text{保}}$ 相对较短, 与钢成分、组织状态有关, 对于碳钢和低合金结构钢可以认为 $t_{\text{保}} = 0$, 对合金工具钢, 模具钢和高速钢, 为简化计算也可采用稍增大的 K 值, 从而计算式可简化为 $t_{\text{加}} = K \cdot W$		
	工件形状	圆 柱	管
	W 值	$D/6 \sim D/4$ 或 $0.167D \sim 0.25D$	$\delta/4 \sim \delta/2$ 或 $0.25\delta \sim 0.5\delta$
	炉 型	盐浴炉 K 值	空气炉 K 值
工件形状	圆柱	0.7	3.5
	板	0.7	4
	薄管 ($\delta/D < 1/4$, $L/D < 20$)	0.7	4
	厚管 ($\delta/D \geq 1/4$)	1.0	5

表 6-5 钢件加热时间计算表

炉型	工件形状	圆柱	板	薄管 ($\delta/D < 1/4$, $L/D < 20$)	厚管 ($\delta/D \geq 1/4$)
	计算值				
盐浴炉	$K/\text{min} \cdot \text{mm}^{-1}$	0.7	0.7	0.7	1.0
	W/mm	$(0.167 \sim 0.25) D$	$(0.167 \sim 0.5) B$	$(0.25 \sim 0.5) \delta$	$(0.25 \sim 0.5) \delta$
	KW/min	$(0.117 \sim 0.175) D$	$(0.117 \sim 0.35) B$	$(0.175 \sim 0.35) \delta$	$(0.25 \sim 0.5) \delta$
空气炉	$K/\text{min} \cdot \text{mm}^{-1}$	3.5	4	4	5
	W/mm	$(0.167 \sim 0.25) D$	$(0.167 \sim 0.5) B$	$(0.25 \sim 0.5) \delta$	$(0.25 \sim 0.5) \delta$
	KW/min	$(0.6 \sim 0.9) D$	$(0.6 \sim 2) B$	$(1 \sim 2) \delta$	$(1.25 \sim 2.5) \delta$
备 注		L/D 值大取上限, 否则取下限	$H, L/B$ 值大取上限, 否则取下限	L/δ 值大取上限否则取下限	L/δ 值大取上限反之取下限

表 6-6 典型钢件在盐浴中的计算和实用加热时间对比

工件形状尺寸 /mm	计算时间/min		实际时间/min:s		淬火后硬度 HRC	备 注
	KW	αD	到温	保温		
45 钢 	6.51 $\left(\frac{D}{6.1}\right)$	12	6:15	0:15	58	
9SiCr 	2.66 $\left(\frac{D}{8}, D\text{—平均直径}\right)$	8	2:30	0	65	隐针 M + A _R + C _R
				5:0	64	隐针 M + A _R + C _R M 针略明显
CrMn 	3.5 $\left(\frac{B}{3.5}\right)$	4.8	3:10	0:20	66	
45 钢 	1.19 $\left(\frac{\delta}{5}\right)$	1.8	1:0	0	59	$\delta/D < 1/4$ 按板计算
20Cr (渗碳淬火) 	3.25 $\left(\frac{\delta}{2}\right)$	2.8	3:0	0	64	$\delta/D < 1/4, l/\delta > 20$ 按管计算
				2:0	63.5	

注：1. M—马氏体；A_R—残留奥氏体；C_R—残留碳化物。

2. 在 $t = \alpha D$ 中，碳钢取 $\alpha = 0.3$ ，合金钢取 $\alpha = 0.4$ ，即取数值范围的下限。

表 6-7 典型钢件在空气炉中的加热时间比较

尺寸 /mm	材 料	件数	按 αD 法计 算的时间 /min	按 KW 法计算的时间 (入炉始算) /min	工件实际到温 时间(入炉始算) /min	按 KW 法工件 实际保温时间 /min	按 KW 法时间与 αD 法时间比例 KW: αD
$\phi 20 \times 180$	45	1	20(20+0)	16.5(0.825D)	12	4.5	0.625
$\phi 40 \times 60$	45	1	40(40+0)	26.2(0.66D)	21	5.2	0.655
$\phi 50 \times 70$	45	1	50(50+0)	32.8(0.66D)	30	2.8	0.655
$\phi 80 \times 120$	45	1	80(80+0)	52.5(0.66D)	50	2.5	0.655
$\phi 100 \times 150$	45	1	102(100+2)	65.6(0.66D)	64	1.6	0.655

(续)

尺寸 /mm	材 料	件数	按 αD 法计 算的时间 /min	按 KW 法计算的时间 (入炉始算) /min	工件实际到温 时间(入炉始算) /min	按 KW 法工件 实际保温时间 /min	按 KW 法时间与 αD 法时间比例 KW: αD
$\phi 30 \times 1130$	65Mn	1	33(30 + 3)	25.9(0.86D)	18	7.9	0.780
$\phi 42 \times 650$	45	4	62(42 + 20)	35.6(0.85D)	34	1.6	0.575
$\phi 80 \times 600$	40CrNiMo	1	160(120 + 40)	66(0.83D)	60	6	0.41
$\phi 85 \times 580$	40CrNiMo	3	157.5(127.5 + 30)	69.5(0.81D)	65	4.5	0.42
$\phi 95 \times 660$	40CrNiMo	2	182.5(142.5 + 40)	76.3(0.8D)	70	6.3	0.42
$\phi 100 \times 760$	40CrNiMo	1	190(150 + 40)	81(0.81D)	70	11	0.42
250 × 310 × 27	CrWMn	2	47.5(40.5 + 7)	45.5(1.67B)	45	0.5	0.96
32 × 53 × 140	45	4	37(32 + 5)	30.6(0.95B) (K = 3.5)	23	7.6	0.82
190 × 190 × 100	45	4	182(100 + 82)	97.6 (0.976B)	95	2.6	0.52
外径 D = 190 内径 d = 60 高度 l = 45	45	10	79(45 + 34)	53(1.18B) (高 l < δ , 按板计)	49	4	0.67

注：在 $t = \alpha D$ 中，碳钢取 $\alpha = 1$ ，合金钢 $\alpha = 1.5$ ，即取数值范围的下限。

表 6-8 工具钢在火焰炉中的加热时间

最大截面尺寸/mm	工件重量/kg	加热总时间/min	加热系数/min·kg ⁻¹
25 ~ 50	45 ~ 136	115	0.85 ~ 2.56
50 ~ 75	136 ~ 227	150	0.66 ~ 1.10
75 ~ 100	227 ~ 454	195	0.43 ~ 0.86
100 ~ 125	454 ~ 680	225	0.33 ~ 0.50
125 ~ 200	680 ~ 908	300	0.33 ~ 0.44

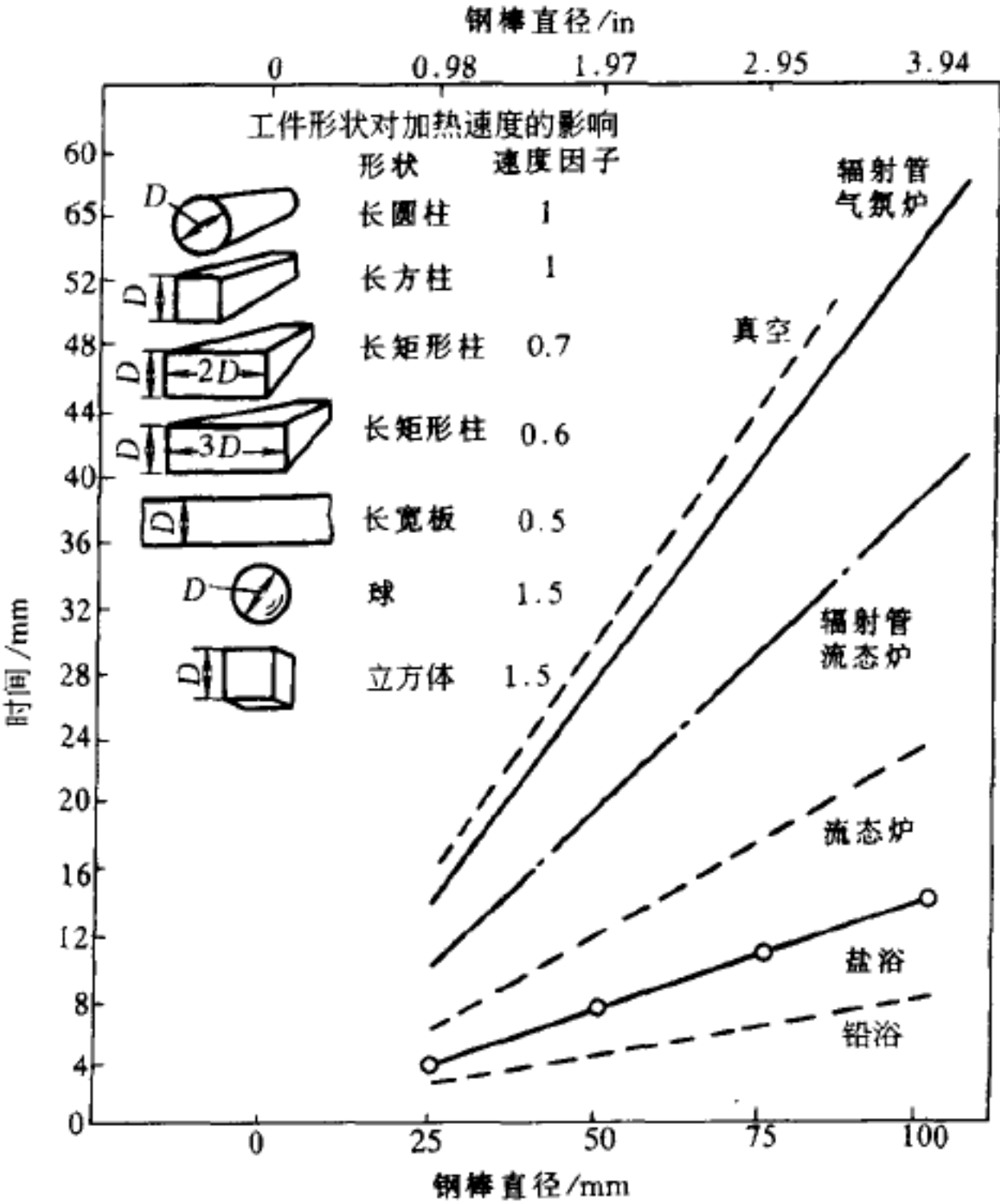


图 6-1 在各种加热介质中的推荐加热时间

6.3 金属在盐浴中的加热

1. 金属及其化合物的熔点 (表 6-9)

表 6-9 金属及其化合物的熔点 (°C)

	一价金属盐					二价金属盐					三价盐	
	Li	Na	K	Rb	Cs	Ca	Sr	Ba	Be	Mg	Al	Ce
纯金属	179	97.7	63.5	3900	28.45	808	~ 800	850	1278	650	660	635
F	845	992	857	790	684	1354	902	1280	—	1270	—	1324
Cl	609	801.3	773.2	714.5	638	776	872	961	425	714	190	848
Br	548	763	739	675.5	631.5	745	643	865	490	711	96	—
J	450	660.3	683.4	639.7	621.0	740	507	740	510	—	190	752
O	—	318.4	360.4	301	—	2574	2430	1923	2450	2800	2030	1692
S	445	445	471	420	460	—	—	—	—	—	1100	—
CO ₃	618	851	891	837	—	1314	1497	1740	—	—	—	—
SO ₄	856	884	1069.5	1062.5	1007.5	1450	1580	1580	—	1124	—	—
NO ₃	264	308	—	309.5	410.5	~ 560	570	592	—	—	—	—

2. 常用混合盐的相图 (图 6-2 ~ 图 6-12)

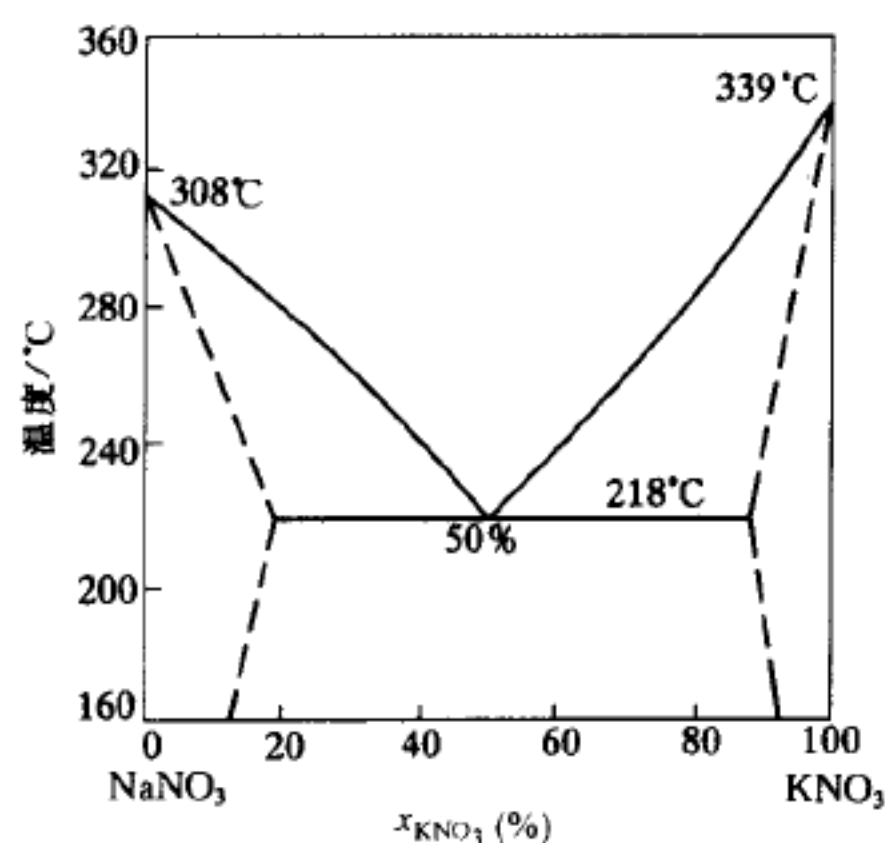


图 6-2 NaNO₃-KNO₃ 相图

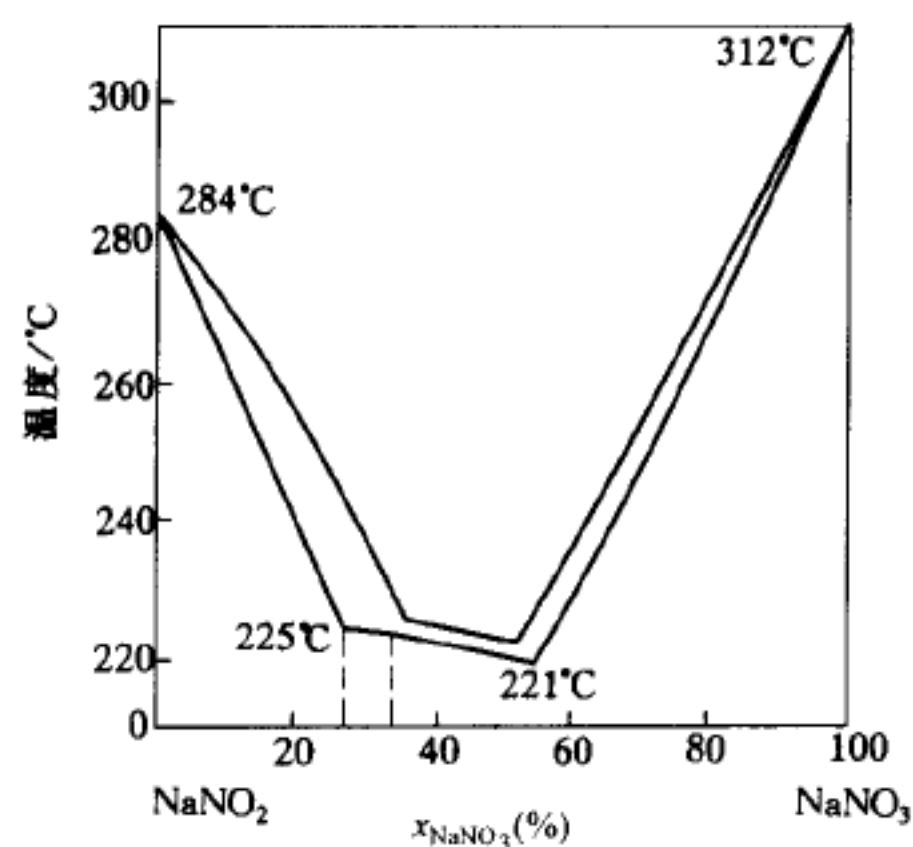


图 6-3 NaNO₂-NaNO₃ 相图

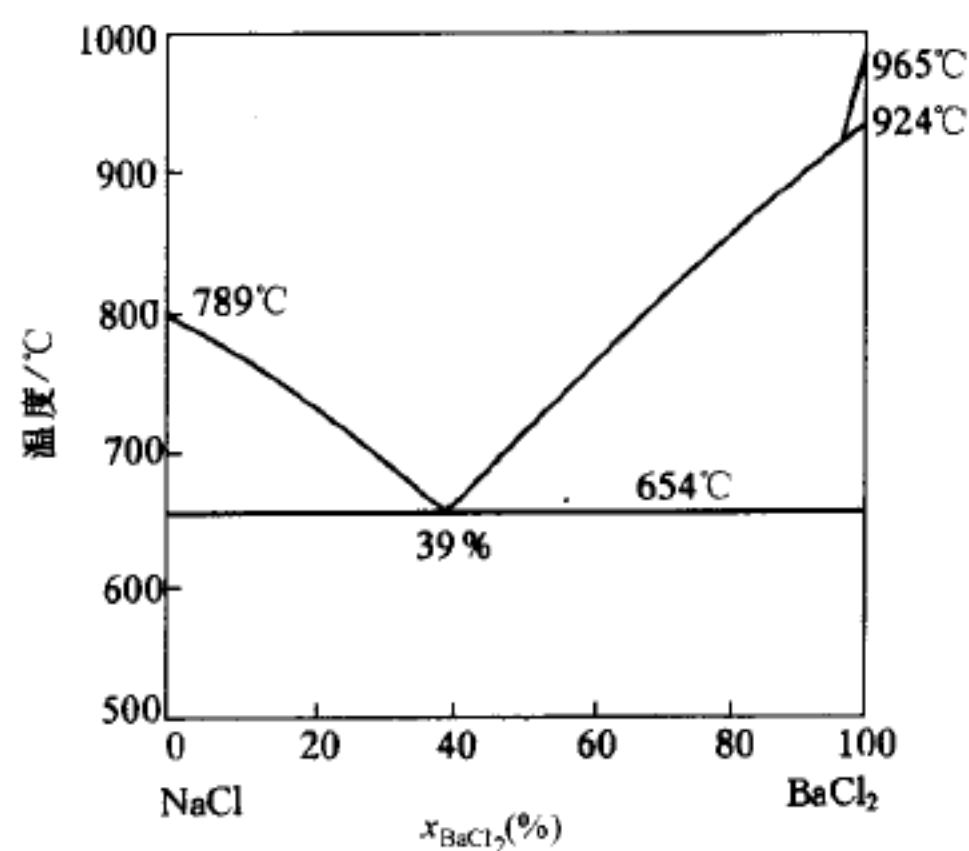


图 6-4 NaCl-BaCl₂ 相图

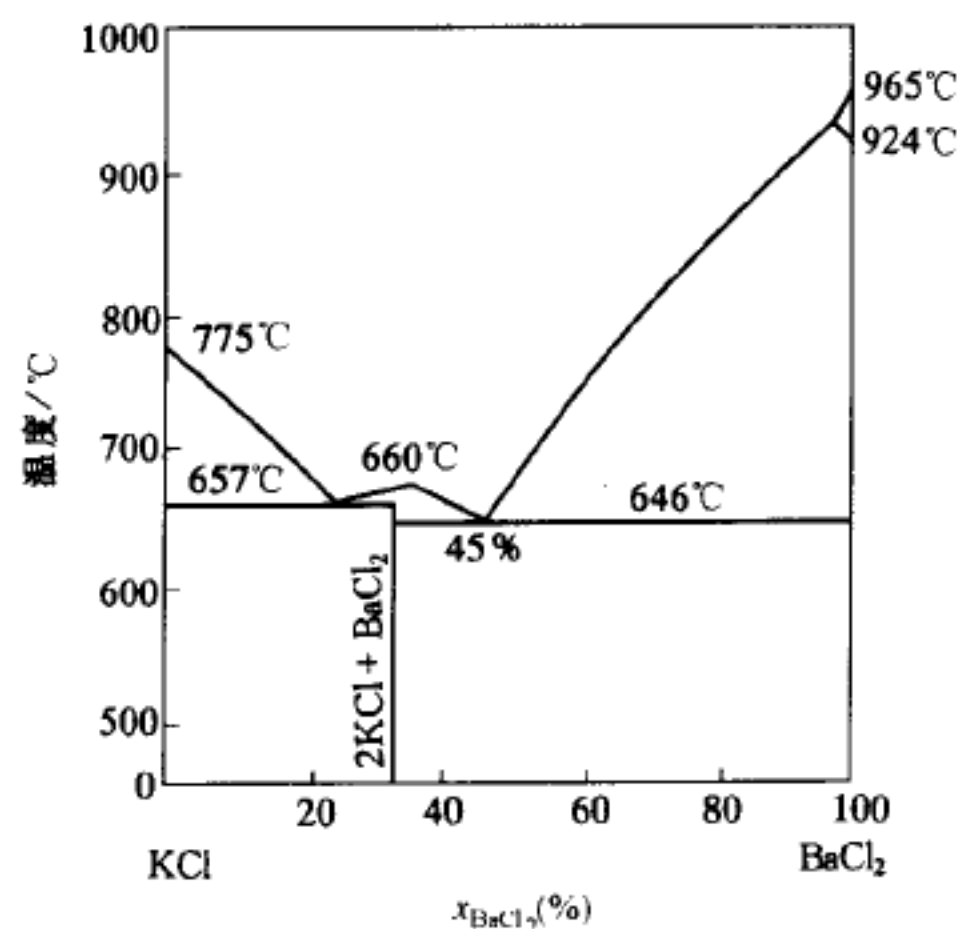


图 6-5 KCl-BaCl₂ 相图

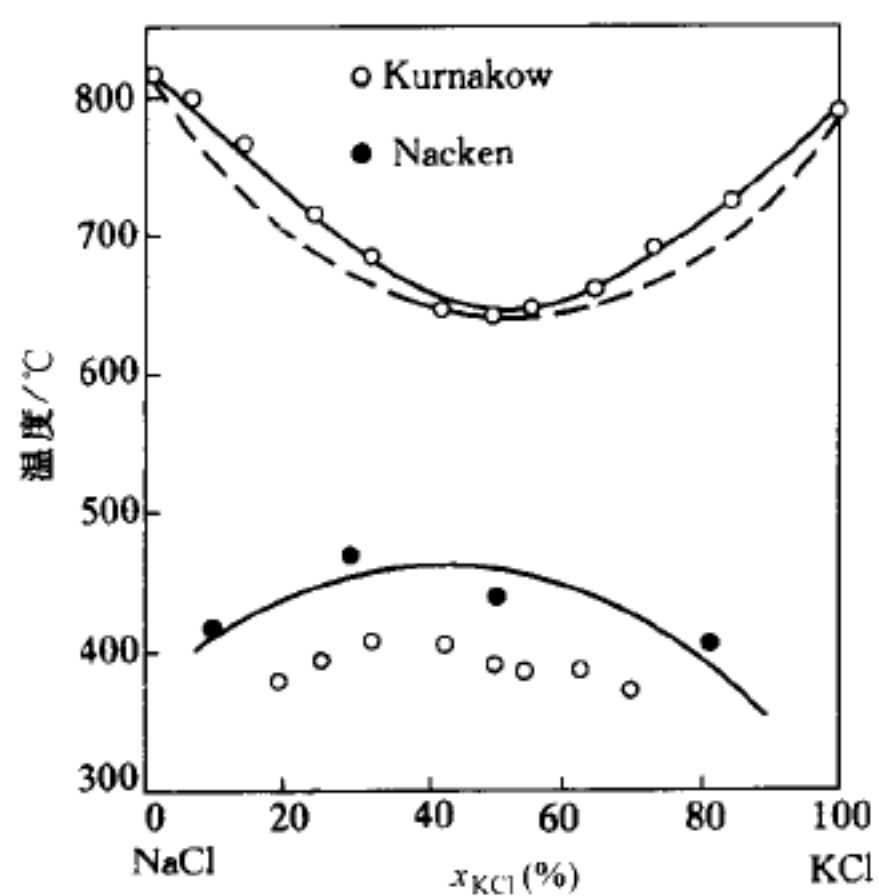
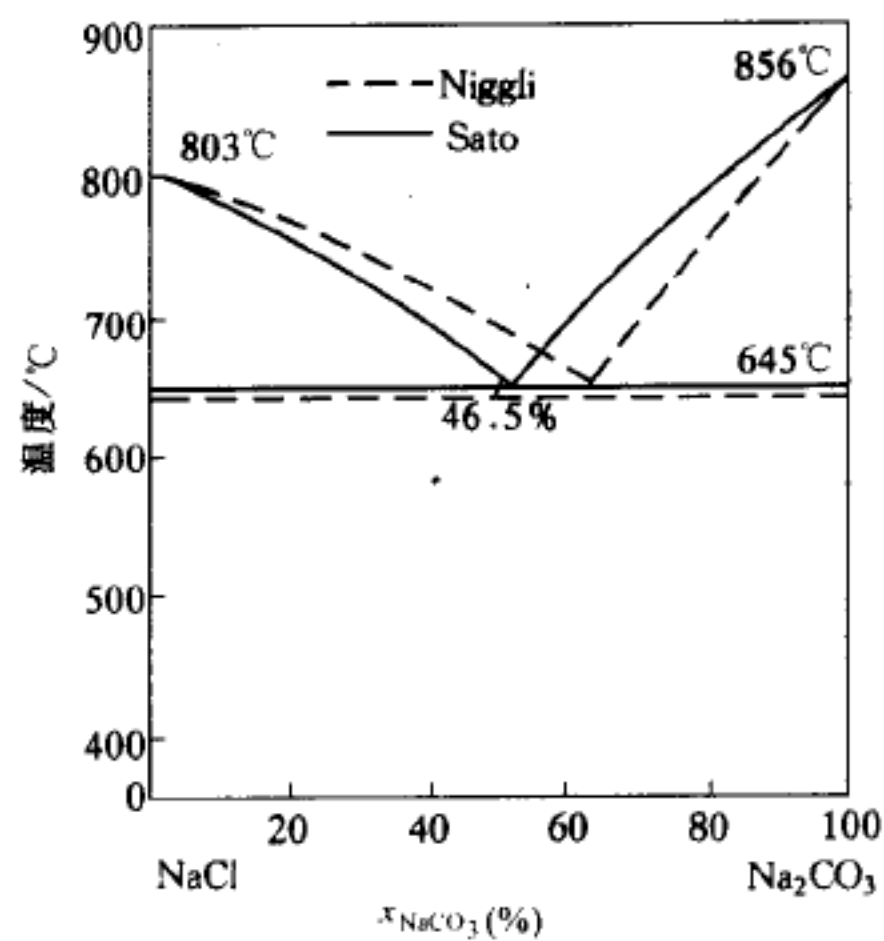
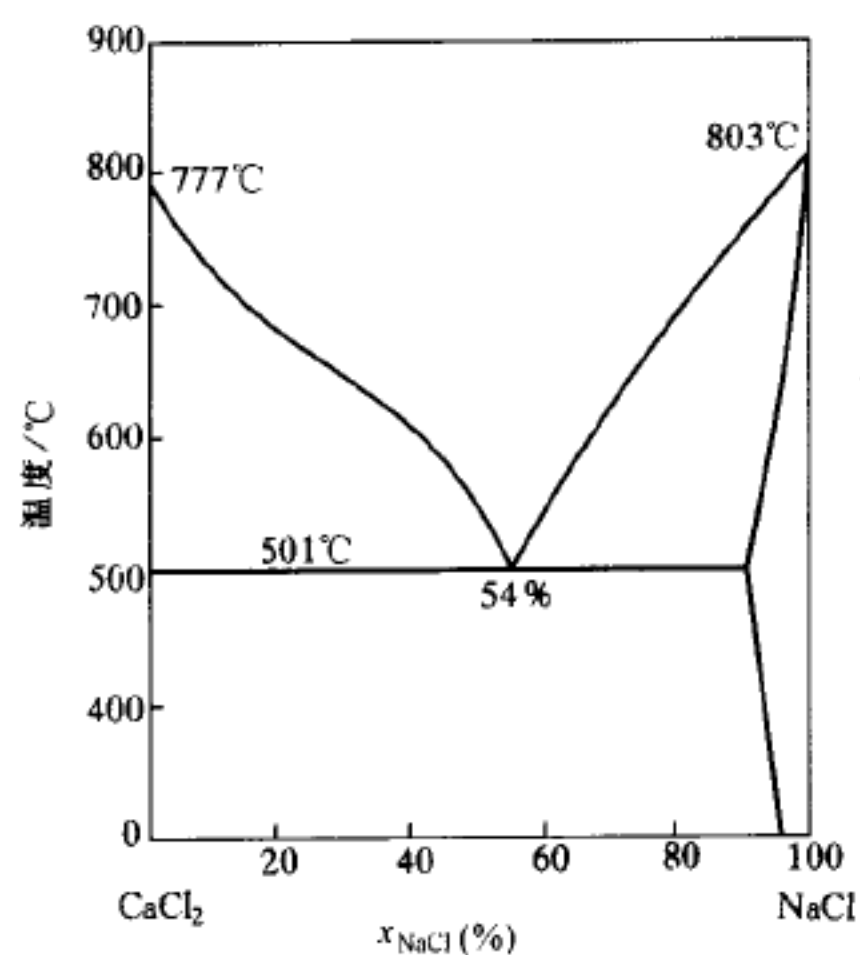
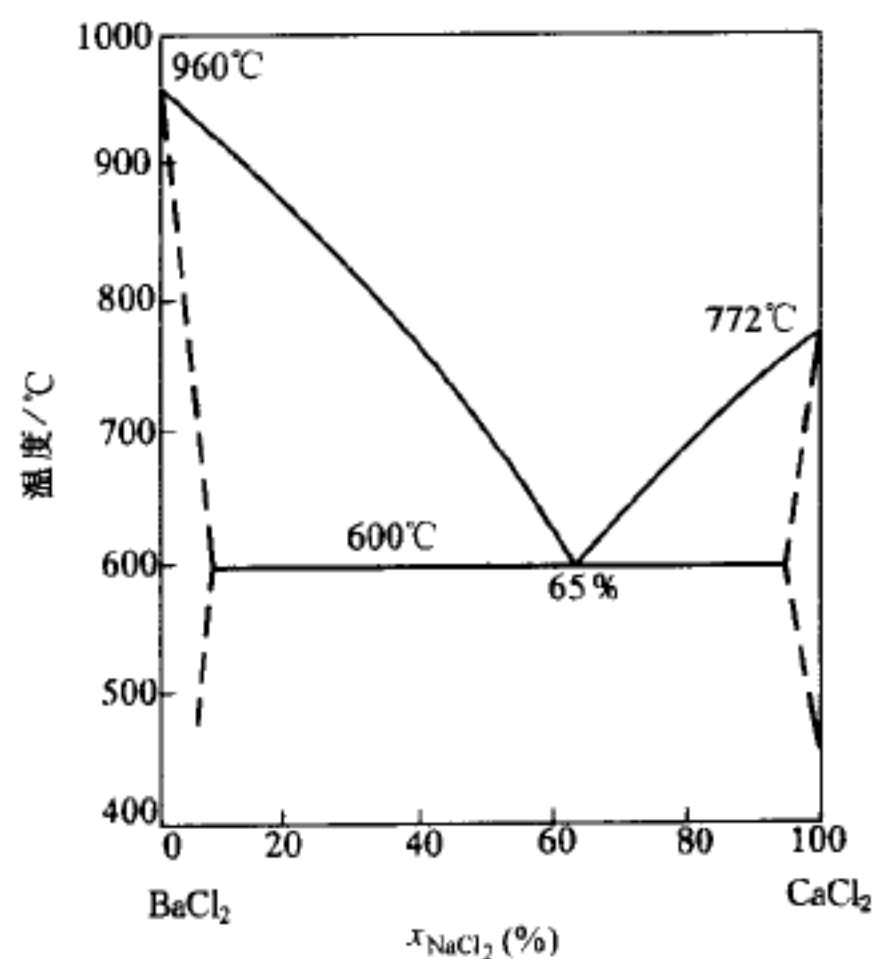
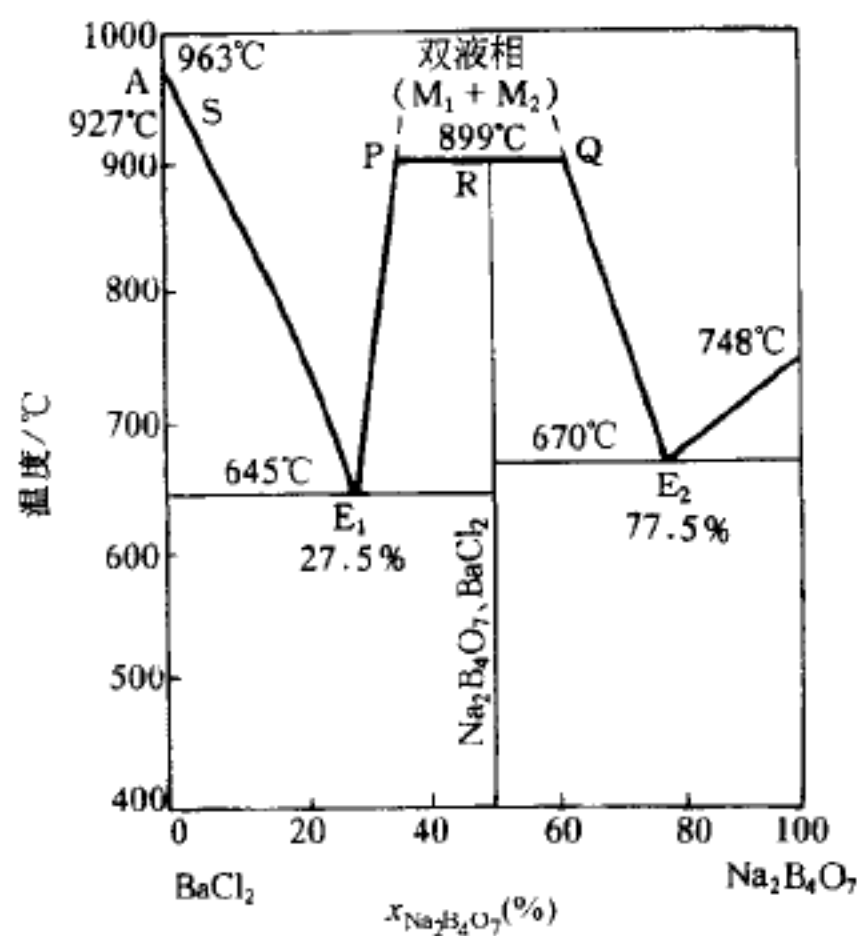
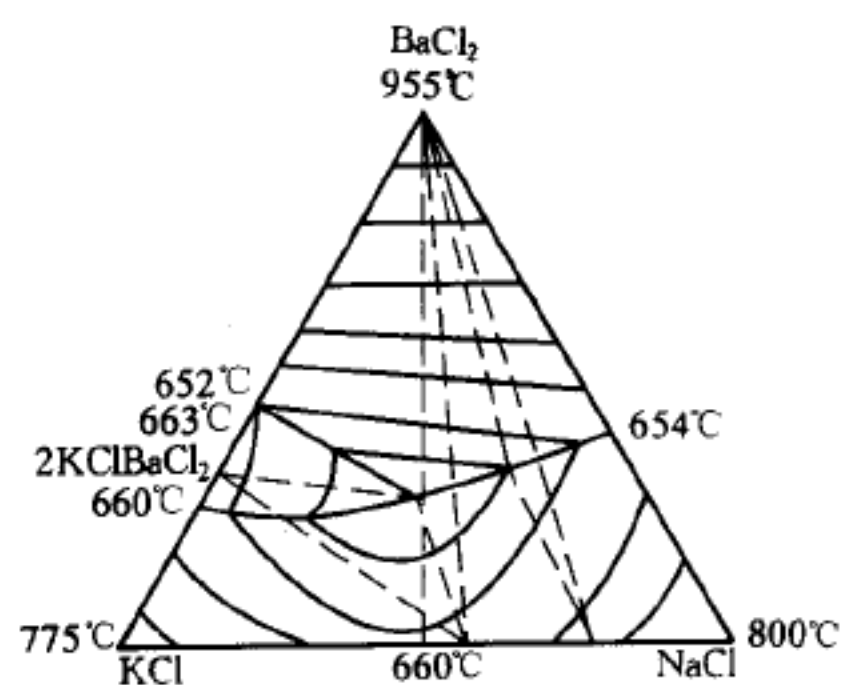


图 6-6 NaCl-KCl 相图

图 6-7 NaCl-Na₂CO₃ 相图图 6-8 CaCl₂-NaCl 相图图 6-9 BaCl₂-CaCl₂ 相图图 6-10 BaCl₂-Na₂B₄O₇ 相图图 6-11 BaCl₂-NaCl-KCl 相图

3. 金属在盐浴中加热的特点 (图 6-13 ~ 图 6-17 和表 6-10 ~ 表 6-12)

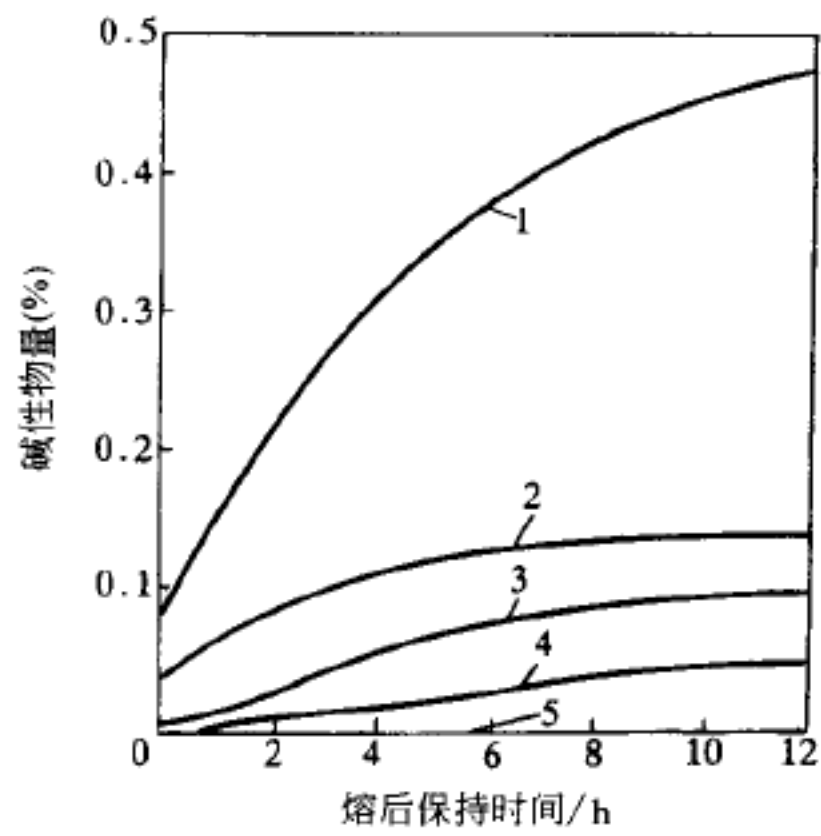


图 6-12 70% NaCl + 30% BaCl₂ 盐浴 (质量百分比) 在 800℃ 时的老化
1—盐浴表面饱和水蒸气 2—常温大气压下饱和水分
3—含水分的 N₂ 4—干燥空气 5—干燥 N₂

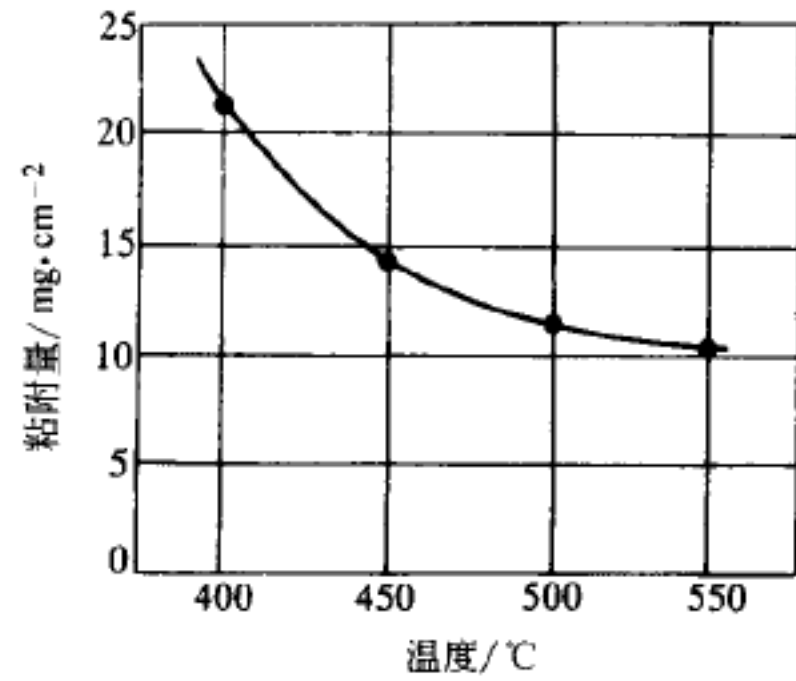


图 6-13 NaNO₃ 浴的粘附量和温度的关系

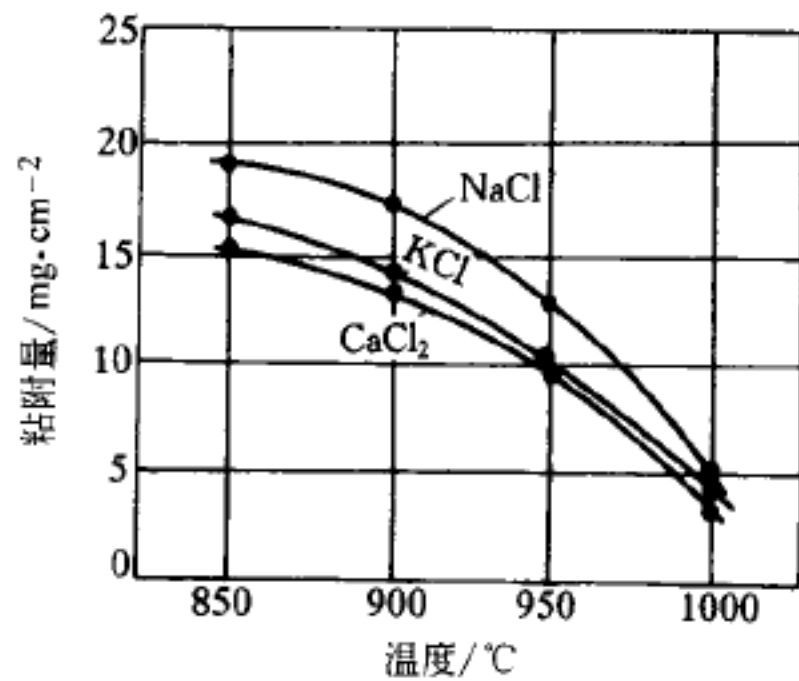


图 6-14 NaCl、KCl、CaCl₂ 单盐的粘附量和温度的关系

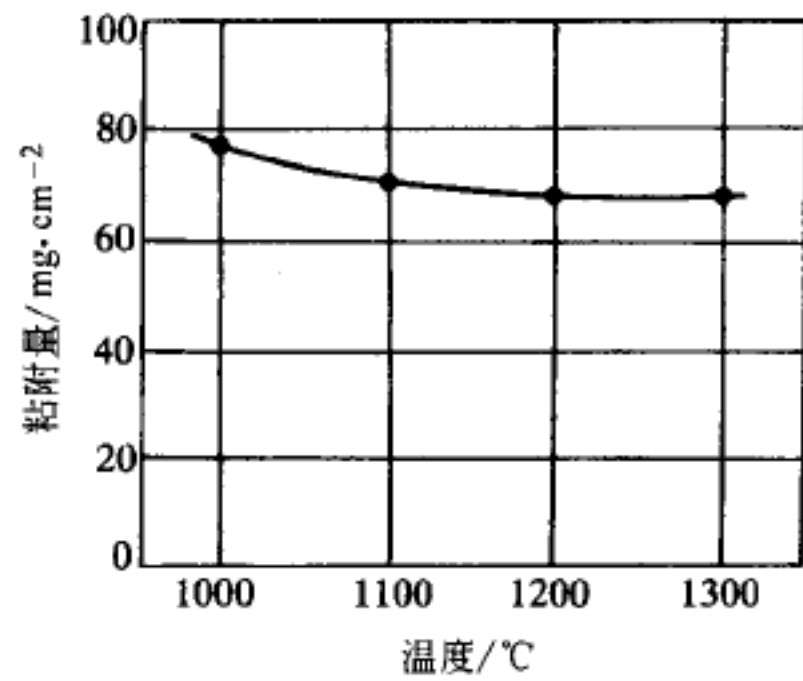


图 6-15 BaCl₂ 单盐的粘附量和温度的关系

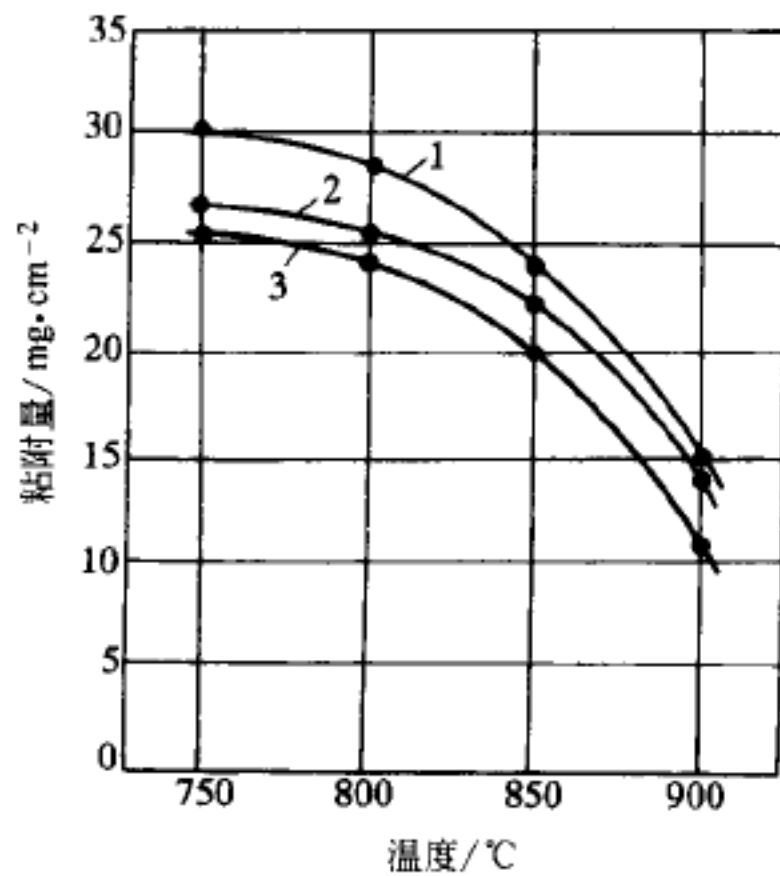


图 6-16 BaCl₂ + NaCl 混合浴 (质量百分比) 的粘附量和温度的关系
1—30% NaCl 2—50% NaCl 3—70% NaCl

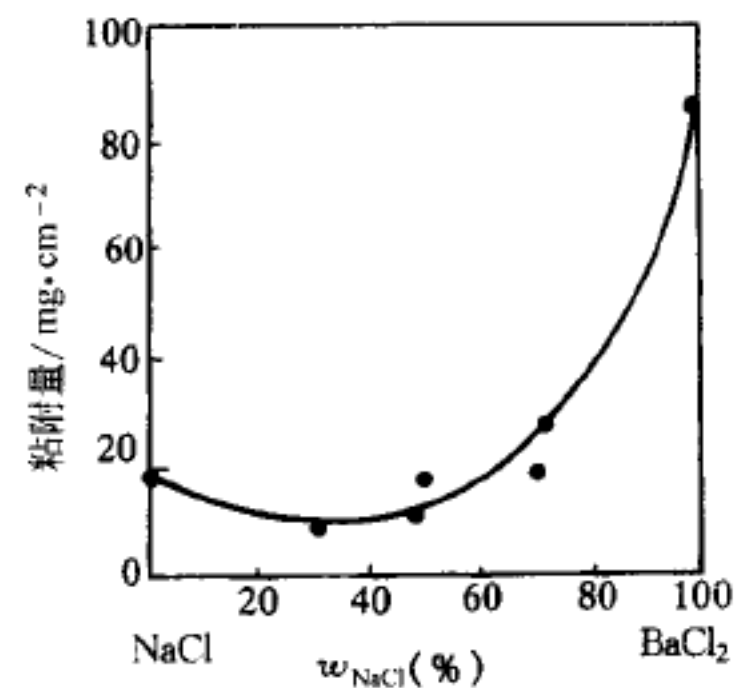


图 6-17 BaCl₂ + NaCl 混合浴的粘附量随成分的变化 (900℃)

表 6-10 熔盐化学反应及其与钢的作用

反应性质	化学反应	反应性质	化学反应
熔盐的老化变质	$2\text{NaCl} + 1/2\text{O}_2 = \text{Na}_2\text{O} + \text{Cl}_2$ $\text{BaCl}_2 + 1/2\text{O}_2 = \text{BaO} + \text{Cl}_2$ $\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O} = \text{NaOH} + \text{HCl}$ $2\text{NaOH} = \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$ $\text{BaCl}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Ba}(\text{OH})\text{Cl} + \text{HCl}$ $\text{Ba}(\text{OH})\text{Cl} = \text{BaO} + \text{HCl}$ $\text{BaCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Ba}(\text{OH})_2 + 2\text{HCl}$ $\text{Ba}(\text{OH})_2 = \text{BaO} + \text{H}_2\text{O}$	熔盐中的氧和水分对钢的氧化和脱碳	$\text{Fe} + 1/2\text{O}_2 = \text{FeO}$ $\text{C}_{(\gamma\text{-Fe})} + 1/2\text{O}_2 = \text{CO}$ $\text{Fe} + \text{H}_2\text{O} = \text{FeO} + \text{H}_2$ $\text{C}_{(\gamma\text{-Fe})} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + \text{H}_2$
		盐中杂质对钢的侵蚀和氧化脱碳	$4\text{Fe} + \text{Na}_2\text{SO}_4 = 3\text{Fe} + \text{Na}_2\text{O} + \text{FeS}$ $\text{Na}_2\text{CO}_3 = \text{Na}_2\text{O} + \text{CO}_2$ $\text{Fe} + \text{CO}_2 = \text{FeO} + \text{CO}$ $\text{C}_{(\gamma\text{-Fe})} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$
		反应生成的腐蚀性气体 Cl_2 、 HCl 对钢表面氧化膜的侵蚀	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 3\text{Cl}_2 = 3\text{FeCl}_2 + 2\text{O}_2$ $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 8\text{HCl} = 3\text{FeCl}_2 + 3\text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2$

表 6-11 盐中杂质对热处理质量的影响

杂质	对工件质量的影响	改善措施
Na_2SO_4 、 CaSO_4 MgSO_4	工业 NaCl 中常含 0.5% ~ 1% 的此类硫酸盐, 后者在高温分解: $\text{Na}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{SO}_3$, $2\text{SO}_3 \rightarrow 2\text{SO}_2 + \text{O}_2$ 生成氧化物, 助长钢的氧化, 脱碳, 并与钢中的 Fe 作用 $2\text{Fe} + 2\text{Na}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{FeS} + 3\text{O}_2 + 2\text{Na}_2\text{O}$, 产生的 FeS 对工件有侵蚀, 在钢件表面形成点蚀	1. 新盐浴经 10 ~ 15h 时效后, 侵蚀、氧化脱碳减轻 2. 定期加脱氧剂 3. 用石灰乳 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 精制
BaSO_4	是高温用盐 BaCl_2 中的杂质, 在高温下分解 $\text{BaSO}_4 \rightarrow \text{BaO} + \text{SO}_2 + 1/2\text{O}_2$, 对高速钢刀具有强烈腐蚀作用, 并引起氧化脱碳, 尤其是新盐浴、点蚀作用强烈	
CaCl_2 、 MgCl_2	极易吸湿, 助长水分的不良影响, 对钢有明显的侵蚀	1. 用前干燥 2. 停炉时要防止吸水 3. 用石灰乳精制产生 Ca 、 Mg 盐沉淀, 然后除去
Na_2CO_3 、 CaCO_3 、 MgCO_3	含碳酸盐盐浴本身呈碱性, 在熔化初期有较强的氧化脱碳作用, 在 $> 800^\circ\text{C}$ 经 15 ~ 20h 碱性物挥发、氧化脱碳逐渐减小	新盐时效后使用
NaOH 、 KOH	含苛性碱浴具有强碱性, 在 $\approx 500^\circ\text{C}$ 易使钢表面产生氧化膜, 不会引起点蚀。但由于 NaOH 的饱和蒸汽压高, 在 800°C 的蒸汽压为 506.16Pa (3.8mmHg) [NaCl 和 BaCl_2 相应为 133.32 ~ 0.34Pa (1mmHg 和 0.00254mmHg)], 因而极易蒸发。新盐经 15 ~ 20h 后氧化脱碳明显减轻	新盐时效后使用

表 6-12 各种盐浴蒸发速度的实测数据^①

熔 盐	温度/ $^\circ\text{C}$	标准蒸发速度 / $\text{mg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{h})^{-1}$	蒸发系数 α
NaCl	1000	51.0	-5.2×10^3
KCl	1000	85.1	-3.6×10^3
BaCl_2	1000	46.8	-5.5×10^3
CaCl_2	1000	36.2	-4.0×10^3
MgCl_2	700	297.8	-3.6×10^3
NaNO_3	700	40.4	-1.9×10^3
KNO_3	550	40.5	-2.7×10^3
KOH	550	182.9	-1.3×10^3
$\text{NaCl} + \text{BaCl}_2 (3:1)$	1000	44.6	-5.7×10^3
$\text{NaCl} + \text{BaCl}_2 (1:1)$	1000	40.4	-5.0×10^3
$\text{NaCl} + \text{BaCl}_2 (1:3)$	1000	34.0	-6.0×10^3
$\text{NaCl} + \text{KCl} (1:1)$	900	57.4	-3.7×10^3
$\text{KCl} + \text{BaCl}_2 (1:1)$	900	38.3	-3.5×10^3
$\text{NaCl} + \text{KCl} + \text{BaCl}_2 (1:1:1)$	900	23.4	-4.2×10^3
$\text{KCl} + \text{CaCl}_2 (3:1)$	1000	61.7	-4.4×10^3
$\text{CaCl}_2 + \text{BaCl}_2 (1:1)$	1000	14.9	-4.7×10^3
$\text{NaNO}_3 + \text{KNO}_3 (3:1)$	700	80.8	-2.2×10^3
$\text{NaCl} + \text{MgCl}_2 (3:1)$	700	36.2	-3.2×10^3
$\text{NaCl} + \text{MgCl}_2 (1:1)$	700	68.1	-3.0×10^3
$\text{NaCl} + \text{MgCl}_2 (1:3)$	700	170.2	-2.2×10^3
$\text{KCl} + \text{MgCl}_2 (1:1)$	700	96.6	-4.0×10^3
$\text{AlF}_3 + \text{NaF} (63:37)$	1000	76.6	-4.2×10^3
$\text{AlF}_3 + \text{NaF} + \text{Al}_2\text{O}_3$ (60% + 35% + 5%)	1000	85.1	-4.4×10^3

① 用本多式热天平测定。

4. 加热盐浴成分 (表 6-13 ~ 表 6-16)

表 6-13 盐浴成分、特点和用途

类别	盐浴成分及配比 (质量分数) (%)	熔点 /℃	使用温度 /℃	特 点	用 途
低温盐浴	20NaOH + 80KOH, 另加 6H ₂ O	130	150 ~ 250	1. NaNO ₃ -KNO ₃ 盐浴应用最为普遍, 但易使钢件氧化侵蚀, 高温易分解 2. NaNO ₂ -KNO ₃ 盐浴以摩尔比 1:1 使用最多、熔点 150 ~ 400℃, 在 425℃ 以上钢件易受氧化侵蚀 3. 硝盐浴中混入油脂, 氰化物, 炭粉易爆炸, 非常危险 4. 含苛性碱 NaOH, KOH 的新浴在 500℃ 以上引起工件严重氧化, 随时间推移, 逐渐减弱	1. 铝合金固溶及时效 2. 结构钢、工模具钢回火 3. 工模具钢、球墨铸铁等温及分级淬火
	35NaOH + 65KOH	155	170 ~ 250		
	45NaNO ₃ + 27.5NaNO ₂ + 27.5KNO ₃	120	240 ~ 260		
	37NaOH + 63KOH	159	180 ~ 350		
	60NaOH + 15NaNO ₃ + 15NaNO ₂ + 10Na ₃ PO ₄	280	380 ~ 500		
	95NaNO ₃ + 5Na ₂ CO ₃	304	380 ~ 520		
	25KNO ₃ + 75NaNO ₃	240	380 ~ 540		
	75NaOH + 25NaNO ₃	280	420 ~ 540		
	50NaNO ₃ + 50KNO ₂	143	160 ~ 550		
	50KNO ₃ + 50NaNO ₃	220	280 ~ 550		
	50NaNO ₂ + 50KNO ₃	225	280 ~ 550		
	100NaNO ₃	271	300 ~ 550		
	100KNO ₃	337	350 ~ 550		
	100NaNO ₂	317	325 ~ 550		
	25NaNO ₂ + 25NaNO ₃ + 50KNO ₃	175	205 ~ 600		
	50NaNO ₃ + 50NaNO ₂	205	260 ~ 600		
	100KOH	360	400 ~ 650		
	100NaOH	322	350 ~ 700		
	60NaOH + 40NaCl	450	500 ~ 700		
中温盐浴	44NaCl + 56MgCl ₂	430	480 ~ 780	1. BaCl ₂ -KCl 盐浴以摩尔比 2:3 (质量百分比 67.2% BaCl ₂ + 32.8% KCl) 最稳定 2. BaCl ₂ -NaCl 盐浴很稳定, 钢件易产生点蚀, 油淬火后表面盐难清除、以摩尔比 2:3 (质量百分比 70% BaCl + 30% NaCl) 盐使用最广 3. BaCl ₂ -CaCl ₂ 浴流动性好, 在大气中放置会大量吸收水分, 重新加热盐易劣化 4. CaCl ₂ -NaCl 浴流动性好, 吸湿, 工件易生锈 5. BaCl ₂ -NaCl-KCl 盐浴性质与 BaCl ₂ -NaCl 和 BaCl ₂ -KCl 无大差别, 但可消除点蚀	1. 结构钢、碳素工具钢、合金工具钢淬火加热 2. 高速钢预热, 回火, 等温淬火 3. 钢铁和非铁金属钎焊
	21NaCl + 31BaCl ₂ + 48CaCl ₂	435	480 ~ 780		
	27.5NaCl + 72.5CaCl ₂	500	550 ~ 800		
	50KCl + 50Na ₂ CO ₃	560	590 ~ 820		
	33.7NaCl + 66.3LiCl	552	570 ~ 850		
	20NaCl + 30KCl + 50BaCl ₂	560	580 ~ 850		
	45KCl + 45Na ₂ CO ₃ + 10NaCl	590	630 ~ 850		
	10NaCl + 45KCl + 45Na ₂ CO ₃	595	630 ~ 850		
	50BaCl ₂ + 50CaCl ₂	595	630 ~ 850		
	50KCl + 20NaCl + 30CaCl ₂	530	560 ~ 870		
	34NaCl + 33BaCl ₂ + 33CaCl ₂	570	600 ~ 870		
	73.5KCl ₂ + 26.5CaCl ₂	600	630 ~ 870		
	40.6BaCl ₂ + 59.2Na ₂ CO ₃	606	630 ~ 870		
	22.5NaCl + 77.5BaCl ₂	635	665 ~ 870		
	50BaCl ₂ + 20NaCl + 30KCl	560	580 ~ 880		
	83.7BaCl ₂ + 16.3Na ₂ CO ₃	640	680 ~ 880		
	55NaCl + 45BaCl ₂	540	570 ~ 900		
	50NaCl + 50Na ₂ CO ₃ (K ₂ CO ₃)	560	590 ~ 900		
	35NaCl + 65Na ₂ CO ₃	620	650 ~ 900		
	67.2BaCl ₂ + 32.8KCl	646	670 ~ 900		
	44NaCl + 56KCl	607	720 ~ 900		
	50BaCl ₂ + 50NaCl	600	650 ~ 1000		
	50BaCl ₂ + 50KCl	640	670 ~ 1000		
	50NaCl + 50KCl	670	720 ~ 1000		
	70 ~ 80BaCl ₂ + 30 ~ 20NaCl	~ 700	750 ~ 1000		
	80 ~ 90BaCl ₂ + 20 ~ 10NaCl	~ 760	820 ~ 1090		
	100Na ₂ CO ₃	852	900 ~ 1000		
	100KCl	772	800 ~ 1000		
	100NaCl	810	850 ~ 1100		

(续)

类别	盐浴成分及配比 (质量分数) (%)	熔点 /℃	使用温度 /℃	特 点	用 途
中温盐浴	5NaCl + 9KCl + 86Na ₂ B ₄ O ₇	640	900 ~ 1100		
	27.5KCl + 72.5Na ₂ B ₄ O ₇	660	900 ~ 1100		
	14NaCl + 86Na ₂ B ₄ O ₇	710	900 ~ 1100		
	90BaCl ₂ + 10NaCl	~ 870	950 ~ 1100		
高温盐浴	100BaCl ₂	960	1000 ~ 1350	1. BaCl ₂ 单盐高温易蒸发氧化变质快 2. 添加高熔点氟盐可减少蒸发, 但侵蚀金属和炉衬 3. 硼砂盐浴防氧化脱碳作用不明显, 且难熔化, 盐浴粘性大, 附在工件上不易清除, 故很少用于一般加热, 主要用做渗硼、渗金属的基盐	1. 高速钢 淬火加热 2. 高强度 不锈钢固溶处理 3. 高温钎焊
	95BaCl ₂ + 5NaCl	850	1000 ~ 1350		
	70BaCl ₂ + 30Na ₂ B ₄ O ₇	940	1050 ~ 1350		
	95 ~ 97BaCl ₂ + 5 ~ 3MgF ₂	940 ~ 950	1050 ~ 1350		
	50BaCl ₂ + 39NaCl + 8Na ₂ B ₄ O ₇ + 3MgO	—	780 ~ 1350		

表 6-14 常用脱氧剂的脱氧反应、使用条件及脱氧效果

脱氧剂	脱 氧 反 应	使 用 条 件	脱 氧 效 果
木炭	$\text{Na}_2\text{SO}_4 + 4\text{C} \rightarrow 4\text{CO} \uparrow + \text{Na}_2\text{S}$	用 $\approx 15\text{mm}$ 的炭块, 经清水冲洗干燥后插入盐浴中	可除去盐浴中的硫酸盐杂质
SiC	$2\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{SiC} \rightarrow \text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{Na}_2\text{O} + 2\text{CO} + \text{C}$	粒度 $0.154 \sim 0.125\text{mm}$ (100 ~ 120 目)	产生的 CO、C 可使氧化物还原, 但脱氧效果不理想
硅胶 (SiO ₂)	$\text{BaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{BaSiO}_3 \downarrow$	与 TiO ₂ 配合使用	脱氧作用较弱, 对电极有严重侵蚀
Ca-Si	$2\text{Ca} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CaO}$ $\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$ $\text{Ca} + \text{BaO} \rightarrow \text{CaO} + \text{Ba}$ $2\text{BaO} + 5\text{Si} \rightarrow 2\text{BaSi}_2 + \text{SiO}_2$ $\text{Ca} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaSiO}_3 \downarrow$ $\text{BaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{BaSiO}_3 \downarrow$	Ca-Si 的成分 (质量分数) 为 Si60% ~ 70%, Ca20% ~ 30%, 少量 Fe, Al。添加后具有迟效性, 在高温保持 15 ~ 20min 后才能进行工件加热, 在高温 ($> 1200^\circ\text{C}$) 不易捞渣	作用时间长, 和 TiO ₂ 并用能弥补 TiO ₂ 的迟效性不佳
Mg-Al	$4\text{Al} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3$ $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{NaO} \rightarrow 2\text{NaAlO}_2 \downarrow$	粒度 $0.5 \sim 1\text{mm}$, Mg: Al = 1:1, 具有速效性	具有强烈脱氧、脱硫作用, 适于中温盐浴脱氧
TiO ₂	$\text{TiO}_2 + \text{BaO} \rightarrow \text{BaTiO}_3 \downarrow$ $\text{TiO}_2 + \text{FeO} \rightarrow \text{FeTiO}_3 \downarrow$	不易捞渣, 最好与硅胶配合使用	脱氧作用强、速效性好、迟效性差, 适用于 1000°C 以上的高温浴, 1000°C 以下不宜单独使用
Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \rightarrow 2\text{NaBO}_2 + \text{B}_2\text{O}_3$ $\text{B}_2\text{O}_3 + \text{BaO} \rightarrow \text{Ba}(\text{BO}_2)_2$ $\text{B}_2\text{O}_3 + \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}(\text{BO}_2)_2$	使用前先脱去结晶水。加入量大 (2% ~ 5%)	不能完全防止脱碳、易侵蚀炉衬和电极
MgF ₂	$\text{MgF}_2 + \text{BaO} \rightarrow \text{BaF}_2 + \text{MgO}$ $\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \downarrow$	对工件、炉衬、电极有侵蚀, 添加氟化钙可缓和	添加氟化钙用于高温盐浴脱氧效果好、腐蚀小
NaCN	$2\text{NaCN} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NaCNO}$ $2\text{NaCNO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CO} + 2\text{N}$	剧毒, 一般很少用	脱氧效果好, 产生的碳酸盐会迅速使盐浴劣化
K ₄ Fe(CN) ₆	$\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6 \rightarrow 4\text{KCN} + \text{Fe}(\text{CN})_2$ $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6 \rightarrow 4\text{KCN} + \text{Fe} + 2\text{C} + 2\text{N}$ $2\text{KCN} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{KCNO}$ $2\text{KCNO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{K}_2\text{CO}_3 + \text{CO} + 2\text{N}$	反应产物有毒, 已很少用	具有和 NaCN 相同的缺点

表 6-15 在 $\text{BaCl}_2 30\% + \text{NaCl} 70\%$ 盐浴中加入脱氧剂的效果
(900°C , 1h, 盐浴表面和正常大气接触)

脱 氧 剂			脱 碳 层/mm			氧化量/ $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$		
名 称	添加量 ^① (%)	粒度/mm	C0.23% 钢	C0.6% 钢	C0.8% 钢	C0.23% 钢	C0.6% 钢	C0.8% 钢
Mg	2.4	0.595	0	0.09	轻微	6.57	6.84	23.60
Al	2.7	0.180	0	轻微	0	7.26	6.89	26.67
含 C3.2% 铁粉	7.8	0.595	0.12	0.20	0.09	12.72	17.62	22.65
Mg-Al(1:1)	3.1	0.595	0.04	0	0	9.26	7.79	14.00
Al-Fe(1:1)	5.3	0.595	0.02	0.06	0.08	20.61	10.11	17.62
Si	2.1	0.595	0	0.13	0.05	22.28	21.52	23.87
Fe-Si	4.95	0.595	0	0.07	0	23.61	15.60	22.83
Fe-Mn	3.0	0.595	0	0.09	0.10	17.49	16.09	17.06
CaSi_2 (Si55%, Ca45%)	3.0	0.595	0.02	0.08	0.07	19.54	17.08	17.71
CaC_2	3.0	0.595	0	0.11	0.13	11.23	10.46	14.53
木炭粉	3.0	0.595	0	轻微	轻微	11.62	16.48	9.8
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	3.0	0.595	0.09	0.45	0.25	31.72	40.55	39.23
硅胶(SiO_2)	3.0	0.180	0.08	0.35	0.23 ~ 0 (不均匀脱碳)	29.32	24.25	19.80
$\text{Ca}(\text{CN})_2$	3.0	0.180	0.05	0.14	0.14	17.59	24.24	35.85
骨炭(含 76% $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)	3.0	0.595	0.04	0.27	0.09 ~ 0.27 (不均匀脱碳)	25.14	19.56	28.42
不加脱氧剂			0.18	0.14	0.09 ~ 0.11	12.80	20.21	18.00

注：成分均指质量分数。

① 在 100g 混合盐中的添加 g 数。

表 6-16 不脱氧长效盐

使用温度/ $^\circ\text{C}$	盐浴成分及配比 (%)	使用 条 件	使用 效 果
700 ~ 940	$67.9\text{BaCl}_2 + 30\text{NaCl} + 2\text{MgF}_2 + 0.1\text{B}$	MgF_2 在 900°C 、 BaCl_2 在 600°C 、 NaCl 在 400°C 焙烧	用含碳 1.4%、厚 0.08mm 钢片在 900°C 保持 10min 测定盐浴活性。经 30 ~ 40h 后，钢片含碳 1.3% ~ 1.35%，用 9SiCr 钢检验无脱碳层
	$66.8\text{BaCl}_2 + 30\text{NaCl} + 3\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + 0.2\text{B}$	硼砂预先经 600°C 焙烧，使用无晶形硼	用上述方法测试的钢片碳含量为 1.24% ~ 1.30%，经 60 天使用，处理 40 万件各种钢件脱 碳质量合格
	$52.8\text{KCl} + 44\text{NaCl} + 3\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + 0.2\text{B}$	硼砂经 500 ~ 600°C 焙烧 3h	在 250kg 盐浴中，于 760 ~ 820°C 进行了 T12 钢 丝锥加热，然后在碱浴中淬火。使用 2 个月后钢 片试验的碳含量都保持在 1.28% ~ 1.30%
950 ~ 1050	$87.9\text{BaCl}_2 + 10\text{NaCl} + 2\text{MgF}_2 + 0.1\text{B}$	含 $\text{MgF}_2 1.5\%$ 效果 不良	钢片试验结果，碳含量保持在 1.05%。但在 1050°C 使用时，在前 20 ~ 30h 盐浴面有薄膜和熔 渣加热操作有困难
	$85.8\text{BaCl}_2 + 10\text{NaCl} + 4\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + 0.2\text{B}$	硼砂经焙烧后盐浴 稳定性好	钢片试验，碳含量保持 1.30% 以上
	$87.8\text{BaCl}_2 + 10\text{NaCl} + 2\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + 0.2\text{B}$	硼砂经焙烧后盐浴 稳定性好	钢片试验，碳含量保持 1.30% 以上
	$94.8\text{BaCl}_2 + 5\text{MgF}_2 + 0.2\text{B}$		
	$96.9\text{BaCl}_2 + 3\text{MgF}_2 + 0.1\text{B}$		
	$96.4\text{BaCl}_2 + 3\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + 0.6\text{B}$	硼砂预先焙烧盐浴 稳定性好	经一昼夜后钢片试验结果碳含量保持在 1.4% ~ 1.3%。经 45h 可保持 1.1%

注：盐浴成分和碳含量均指质量分数。

6.4 金属在流态炉中的加热 (图 6-18 ~ 图 6-22)

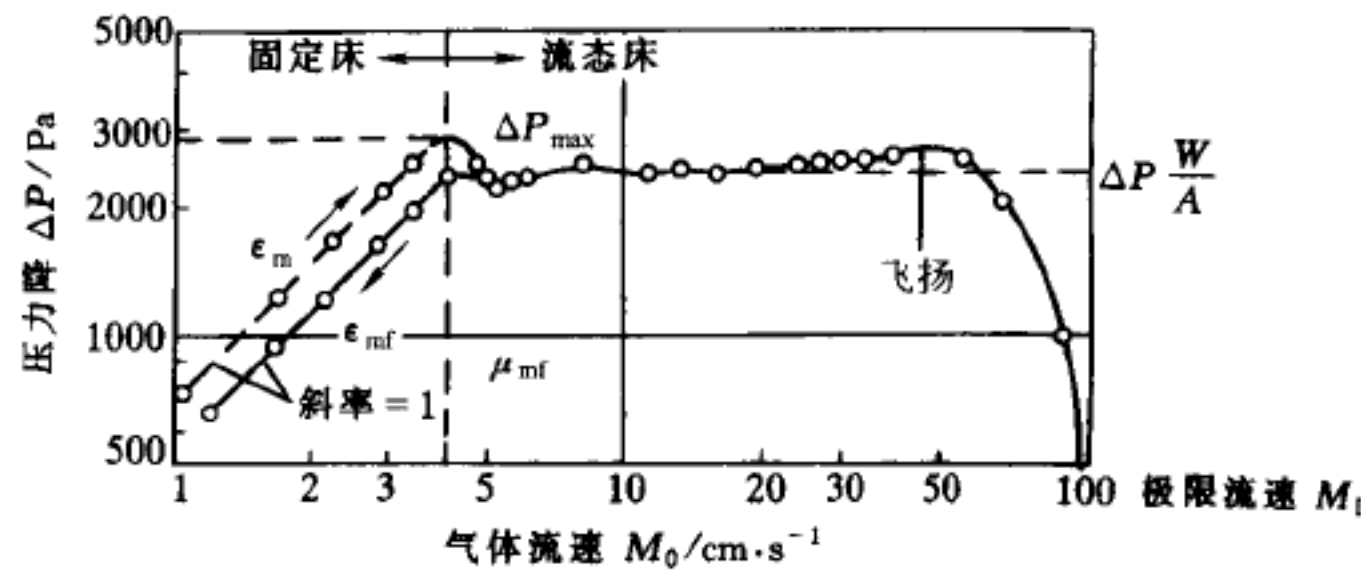


图 6-18 均匀粒子流态床压力降和气体流速的关系

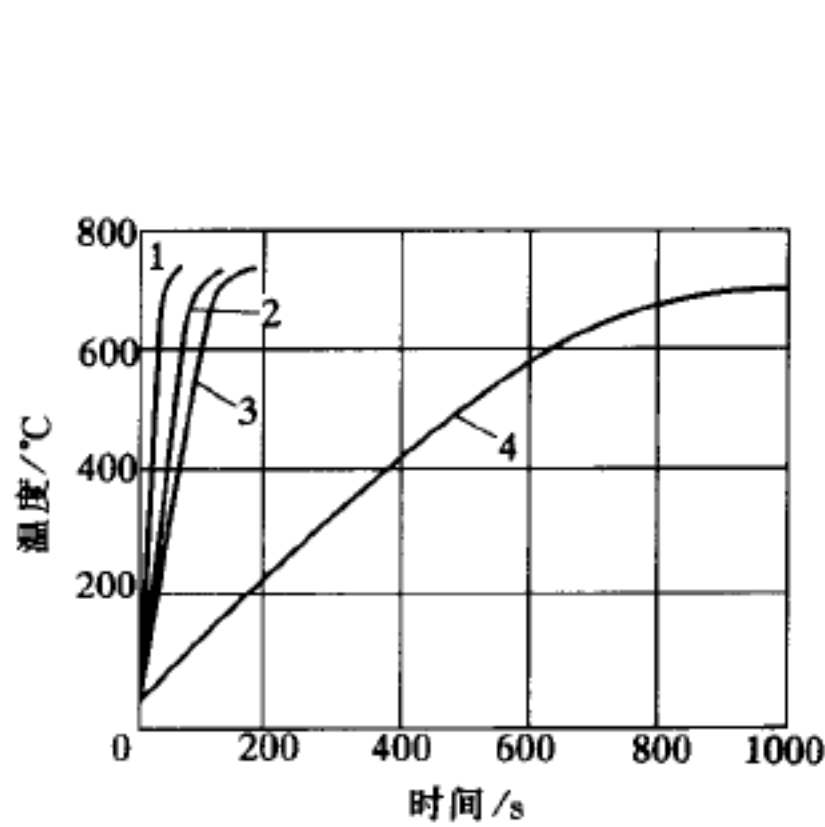


图 6-19 钢棒 (φ16mm) 在铅浴、盐浴、流态床和普通电阻炉中的加热速度
1—铅浴 2—盐浴 3—流态床 4—普通电阻炉

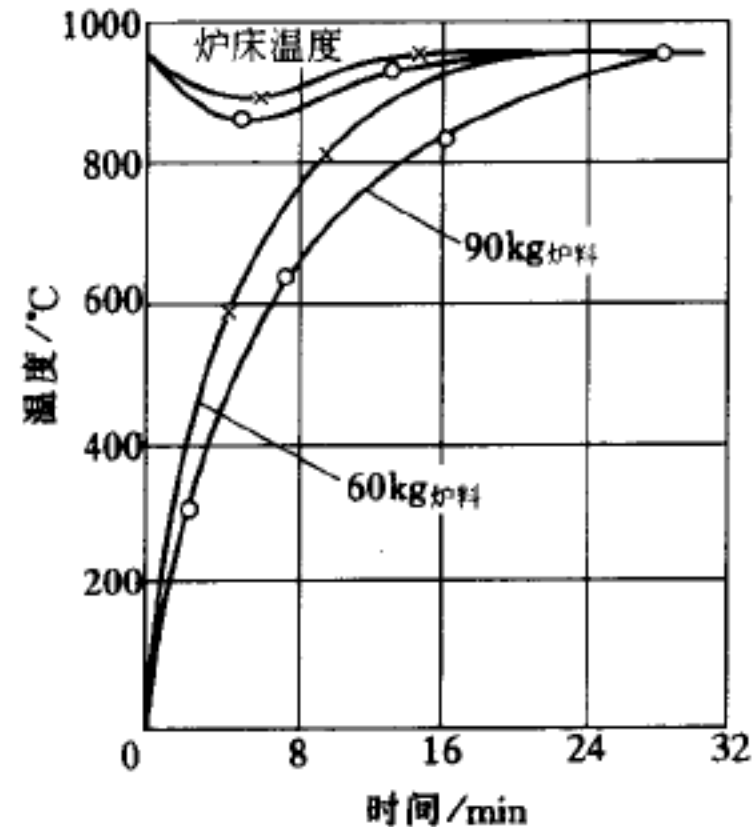


图 6-20 钢棒 (φ25mm) 在流态床 (0.3m³ 容积) 中加热时的炉温恢复速度

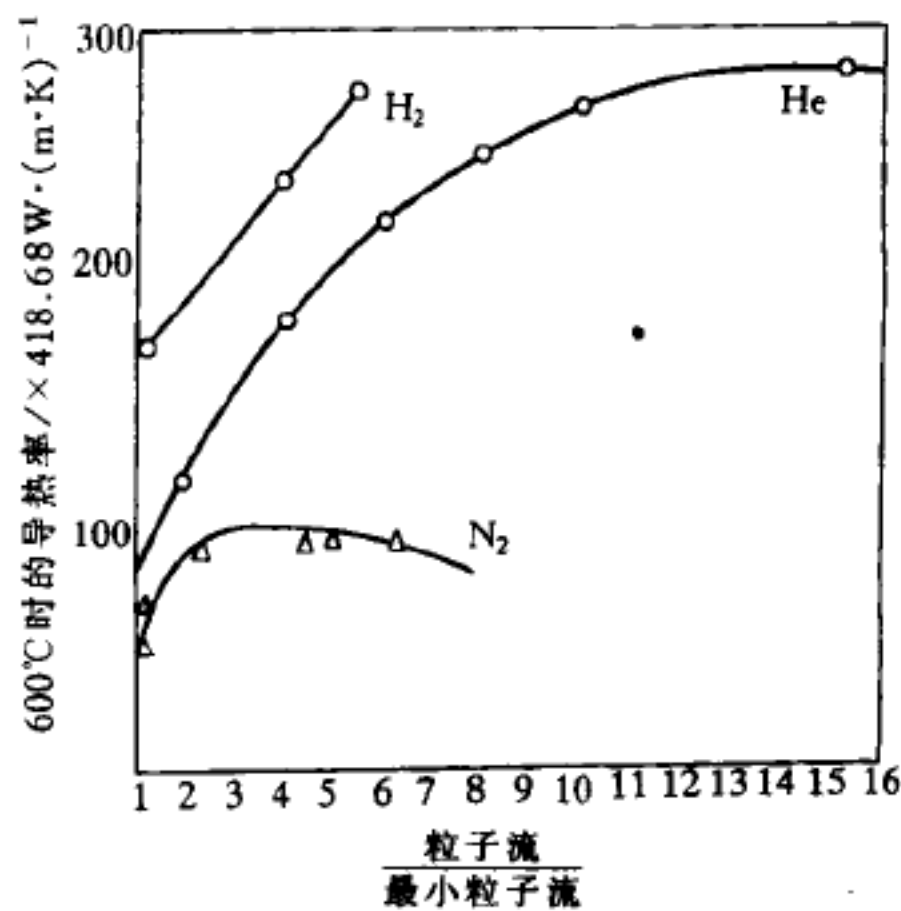


图 6-21 流态气体对热导率的影响

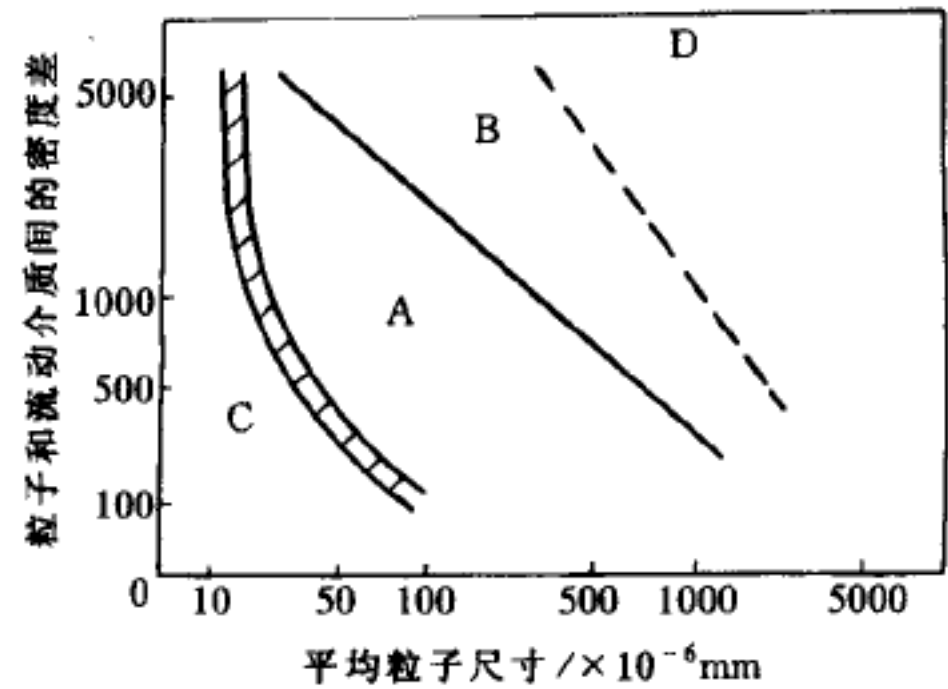


图 6-22 固态粒子的选择对流态床性质的影响
A—气溶膜 B—砂气泡
C—具有粘聚性 D—密集喷射
(最理想的状态是 B，此时 Al₂O₃ 粒热导率最高)

6.5 金属在可控气氛中的加热 (表 6-17、表 6-18 和图 6-23 ~ 图 6-26)

表 6-17 Fe-C 合金在多组元气氛中加热时的反应

混合气体种类	反应类型	合金表面反应	属于此类的气氛
H ₂ -H ₂ O	氧化与还原 脱碳	$\text{Fe} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{FeO} + \text{H}_2$ $\text{H}_2\text{O} + \text{C}_{\gamma\text{-Fe}} \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2$ $2\text{H}_2 + \text{C}_{\gamma\text{-Fe}} \rightleftharpoons \text{CH}_4$	1. 具有一定露点的纯氢 2. 氢分解气氛 3. 氢燃烧气氛
CO-CO ₂	氧化与还原 增碳与脱碳	$\text{Fe} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{FeO} + \text{CO}$ $\text{CO}_2 + \text{C}_{\gamma\text{-Fe}} \rightleftharpoons 2\text{CO}$	木炭燃烧气氛
H ₂ -CO-CO ₂ -H ₂ O-N ₂	氧化与还原 增碳与脱碳	$\text{Fe} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{FeO} + \text{CO}$ $\text{Fe} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{FeO} + \text{H}_2$ $\text{CO}_2 + \text{C}_{\gamma\text{-Fe}} \rightleftharpoons 2\text{CO}$ $\text{H}_2\text{O} + \text{C}_{\gamma\text{-Fe}} \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2$	1. 放热式气氛 2. 吸热式气氛 3. 甲醇裂解气 4. 甲醇+氮合成气氛

表 6-18 制备气氛的化学反应及成分

气氛种类	制备原(燃)料	化学反应	参考成分 (体积分数)(%)	用途
放热式	天然气(甲烷) + 空气 ($\alpha = 0.6 \sim 0.9$) ^① 丙烷+空气 丁烷+空气	$\text{CH}_4 + 9.52 (0.21\text{O}_2 + 0.79\text{N}_2) =$ $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 7.52\text{N}_2$ $\text{C}_3\text{H}_8 + 23.81 (0.21\text{O}_2 + 0.79\text{N}_2) =$ $3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O} + 18.8\text{N}_2$ $\text{C}_4\text{H}_{10} + 30.98 (0.21\text{O}_2 + 0.79\text{N}_2) =$ $4\text{CO} + 5\text{H}_2\text{O} + 24.4\text{N}_2$	H ₂ 2 ~ 15, CO 3 ~ 12, H ₂ O 15 ~ 18, CO ₂ 5 ~ 10, N ₂ 70 ~ 85	无氧化保护, 炉气置换
吸热式	天然气(甲烷) + 空气 ($\alpha = 0.2 \sim 0.4$) ^① 丙烷+空气 丁烷+空气	$\text{CH}_4 + 2.38 (0.21\text{O}_2 + 0.79\text{N}_2) =$ $\text{CO} + 2\text{H}_2 + 1.88\text{N}_2$ $\text{C}_3\text{H}_8 + 7.14 (0.21\text{O}_2 + 0.79\text{N}_2) =$ $3\text{CO} + 4\text{H}_2 + 5.64\text{N}_2$ $\text{C}_4\text{H}_{10} + 9.52 (0.21\text{O}_2 + 0.79\text{N}_2) =$ $4\text{CO} + 5\text{H}_2 + 7.52\text{N}_2$	CO 20, H ₂ 40, N ₂ 40, D. P. 0 ~ -5℃ CO 24, H ₂ 33, N ₂ 其余 D. P. 0 ~ -5℃ CO 24, H ₂ 30, N ₂ 其余, D. P 0℃	无氧化, 无脱碳 保护渗碳、碳氮共 渗载气
氢分解气	液氢	$2\text{NH}_3 \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{N}_2$	H ₂ 75, N ₂ 25	不锈钢无氧化保护, 粉末烧结
有机液体裂解	甲醇	$\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$	H ₂ 66.6, CO 33.3	无氧化保护, 渗碳载气
合成气氛	甲醇+氮	$\text{CH}_3\text{OH} + 2\text{N}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2 + 2\text{N}_2$	H ₂ 40, CO 20, N ₂ 40	保护, 载气

① α -燃烧系数或燃烧过剩系数, 即完全燃烧程度。

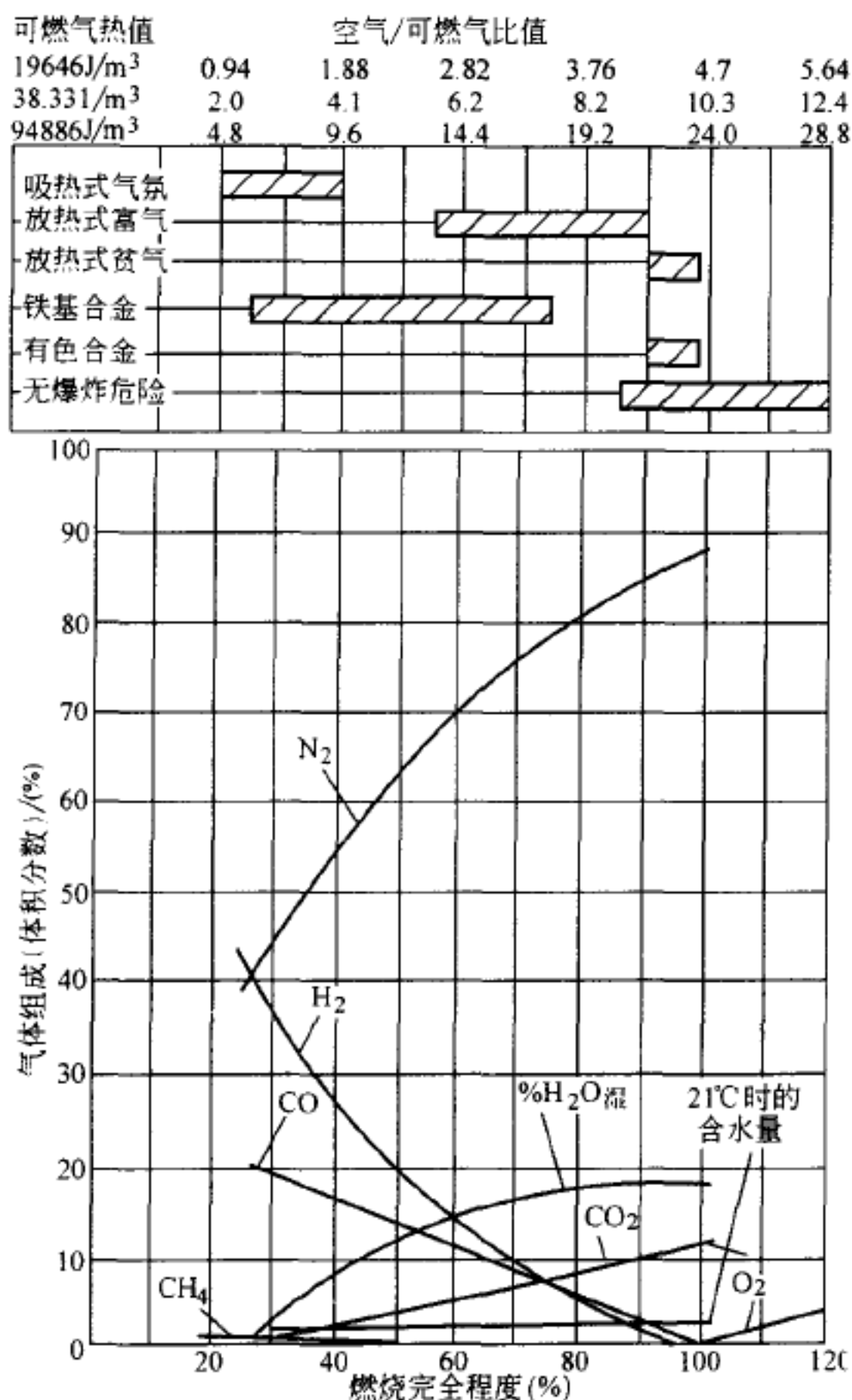


图 6-23 以不同空气/可燃气比例制备的气体各组份间的关系

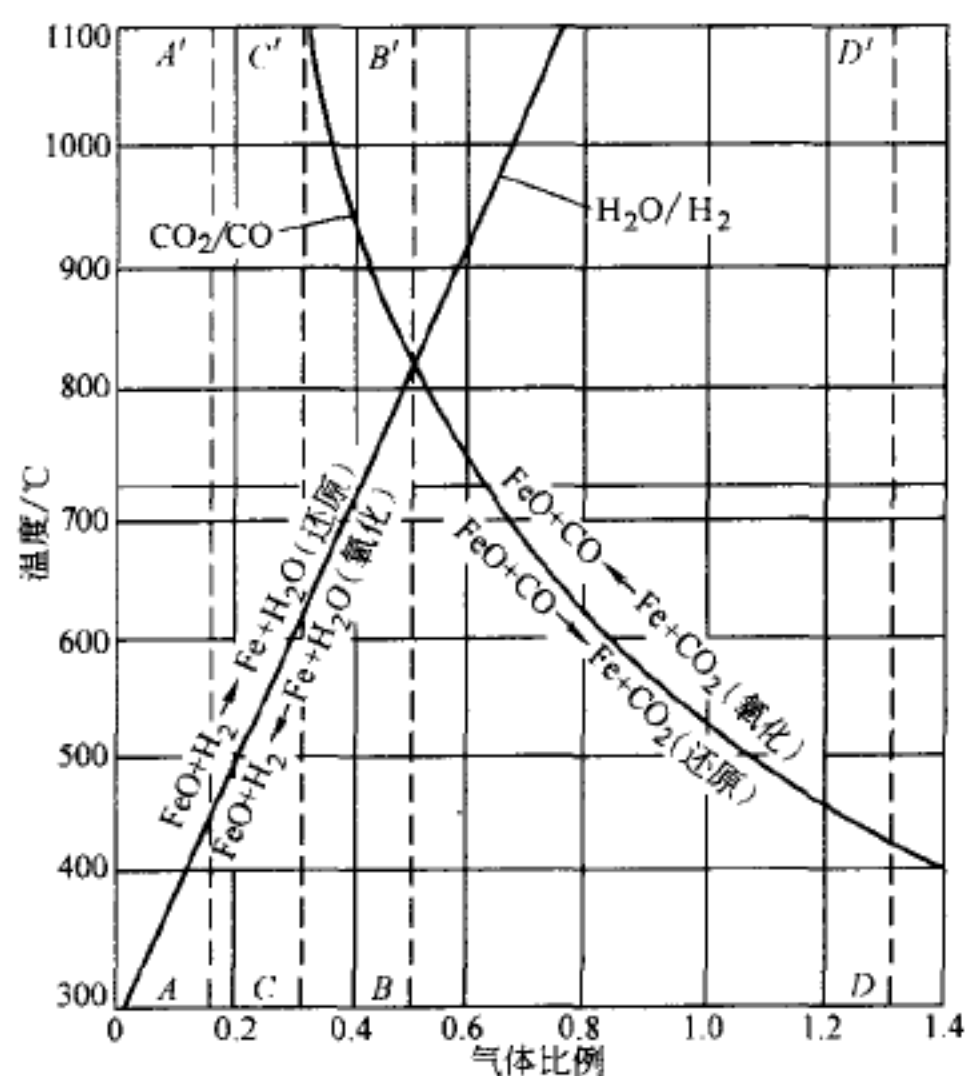


图 6-24 Fe—FeO—H₂—H₂O 和 Fe—FeO—CO—CO₂ 体系的理论平衡曲线

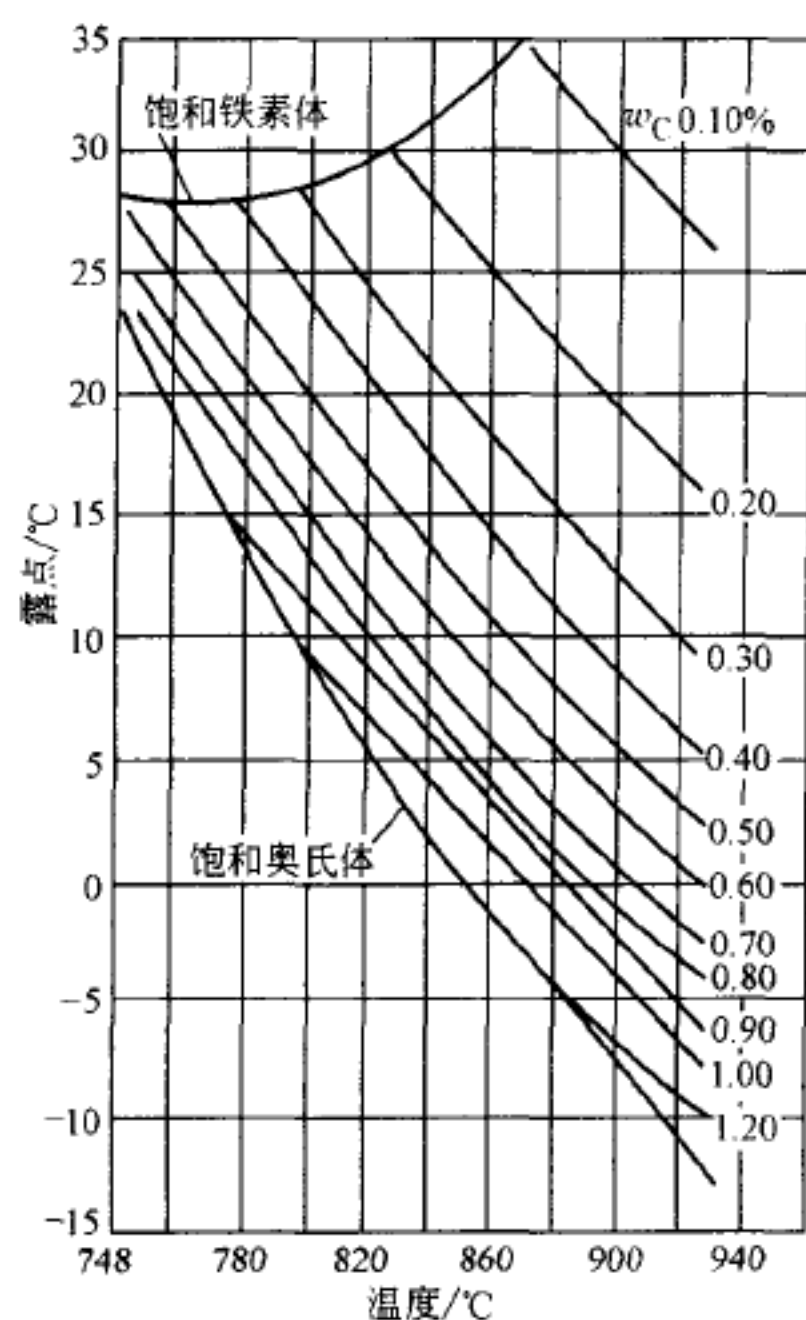


图 6-25 甲烷制备的吸热式气氛露点与钢表面碳含量的平衡曲线 (炉气氛 (体积分数) H₂ = 40%, CO₂ + CO = 20%)

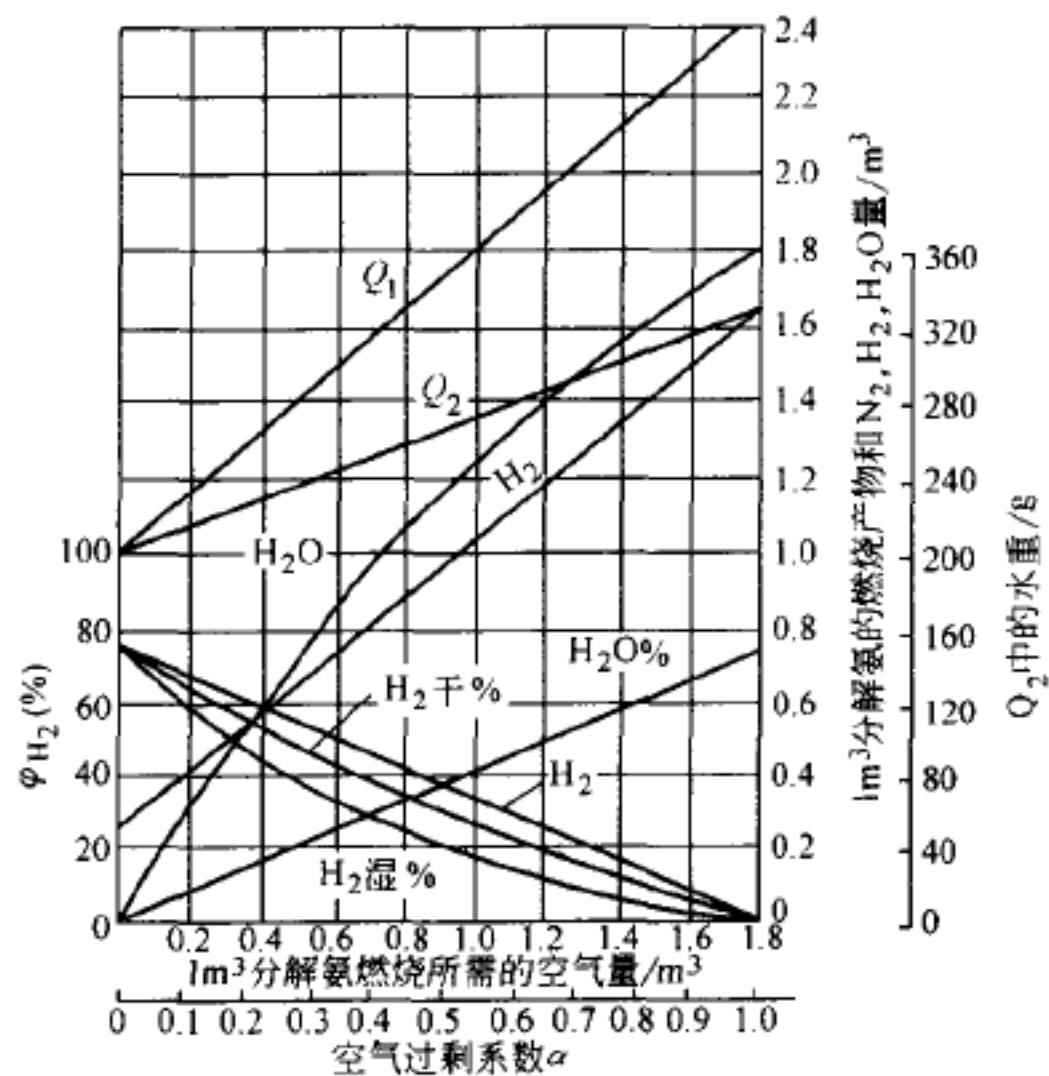


图 6-26 氨燃烧气氛的燃烧产物体积和气体成分
Q₁ 为湿燃烧产物体积; Q₂ 为干燃烧产物体积

6.6 金属在真空中的加热 (表 6-19 ~ 表 6-21 和图 6-27 ~ 图 6-32)

表 6-19 真空技术的压力范围及其特性

特性	低真空	中高真空	高真空	超高真空
压力/torr ^①	760 ~ 1	1 ~ 10 ⁻³	10 ⁻³ ~ 10 ⁻⁷	< 10 ⁻⁷
分子数/个·cm ⁻³	10 ¹⁹ ~ 10 ¹⁶	10 ¹⁶ ~ 10 ¹³	10 ¹³ ~ 10 ⁹	< 10 ⁹
碰壁数/次 (cm ² ·s) ⁻¹	10 ²⁴ ~ 10 ²⁰	10 ²⁰ ~ 10 ¹⁷	10 ¹⁷ ~ 10 ¹³	< 10 ¹³
分子碰撞/次 (cm ³ ·s) ⁻¹	10 ²⁹ ~ 10 ²³	10 ²³ ~ 10 ¹⁷	10 ¹⁷ ~ 10 ⁹	< 10 ⁹
平均自由程/cm	10 ⁻⁵ ~ 10 ⁻²	10 ⁻² ~ 10 ¹	10 ¹ ~ 10 ⁵	> 10 ⁵
气流本质	连续流	努森 (knudsen) 分子流	分子流	单个分子运动
特殊现象	取决于压力的对流	取决于容器尺寸和自由行程比值的迁移现象	和压力成比例的迁移现象	单分子层时间 长过数秒以上

① 1torr = 1.33 × 10² Pa。

表 6-20 真空压力单位换算

	torr	dyn/cm ²	mbar	bar	kgf/m ²	kgf/cm ²	atm	lbf/in ²	μm	inHg 柱	N/m ² (Pa)
1mmHg 柱 (torr)	1	1.33 × 10 ³	1.33	1.33 × 10 ⁻³	13.59	1.35 × 10 ⁻³	1.31 × 10 ⁻³	1.93 × 10 ⁻²	10 ³	3.93 × 10 ⁻²	1.33 × 10 ²
1μbar	0.75 × 10 ⁻³	1	10 ⁻³	10 ⁻⁶	1.01 × 10 ⁻²	1.01 × 10 ⁻⁶	0.96 × 10 ⁻⁶	1.45 × 10 ⁻⁵	0.75	2.95 × 10 ⁻⁵	10 ⁻¹
1mbar	0.75	10 ³	1	10 ⁻³	10.1	1.01 × 10 ⁻³	0.98 × 10 ⁻³	1.45 × 10 ⁻²	0.75 × 10 ³	2.95 × 10 ⁻²	10 ²
1bar	750	10 ⁶	10 ³	1	1.01 × 10 ⁴	1.01	0.98	1.45 × 10 ¹	0.75 × 10 ⁶	2.95 × 10 ¹	10 ⁵
1mmH ₂ O 柱	0.735 × 10 ⁻¹	0.98 × 10 ²	0.98 × 10 ⁻¹	0.98 × 10 ⁻⁴	1	10 ⁻⁴	0.967 × 10 ⁻⁴	1.42 × 10 ⁻³	0.73 × 10 ²	2.89 × 10 ⁻³	9.8
1technical atm (at)	735.5	0.98 × 10 ⁶	0.98 × 10 ³	0.98	10 ⁴	1	0.967	1.42 × 10 ¹	0.73 × 10 ⁶	2.89 × 10 ¹	9.8 × 10 ⁴
1physical atm (atm)	760	1.01 × 10 ⁶	1.01 × 10 ³	1.01	1.03 × 10 ⁴	1.03	1	1.46 × 10 ¹	0.76 × 10 ⁶	2.99 × 10 ¹	1.01 × 10 ⁵
1in/in ²	5.17 × 10 ⁻¹	0.688 × 10 ⁵	0.688 × 10 ²	0.688 × 10 ⁻¹	0.70 × 10 ³	0.70 × 10 ⁻¹	0.68 × 10 ⁻¹	1	5.17 × 10 ⁴	2.03	0.688 × 10 ⁴
1μm	10 ⁻³	1.33	1.33 × 10 ⁻³	1.33 × 10 ⁻⁶	1.35 × 10 ⁻²	1.35 × 10 ⁻⁶	1.31 × 10 ⁻⁶	1.93 × 10 ⁻⁶	1	3.93 × 10 ⁻⁵	13.3
1inHg 柱	25.4	0.338 × 10 ⁵	0.338 × 10 ²	0.338 × 10 ⁻¹	0.34 × 10 ³	0.34 × 10 ⁻¹	0.33 × 10 ⁻¹	0.49	2.54 × 10 ⁴	1	0.338 × 10 ⁴
1N/m ²	7.5 × 10 ⁻³	10 ¹	10 ²	10 ⁻⁵	0.101	1.01 × 10 ⁻⁵	9.8 × 10 ⁻⁶	1.45 × 10 ⁻⁴	7.5	2.95 × 10 ⁻⁴	1

表 6-21 不同真空度下的残存杂质质量和所对应的露点

真空压力/torr ^①	100	10	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵
相应杂质质量 (体积分数) (%)	13.4	1.34	0.134	0.0134				
相应杂质质量 / × 10 ⁻⁶					13.4	1.34	0.134	0.0134
相应露点/℃		+ 11	- 18	- 40	- 59	- 74	- 88	- 101

① 1torr = 133.32Pa。

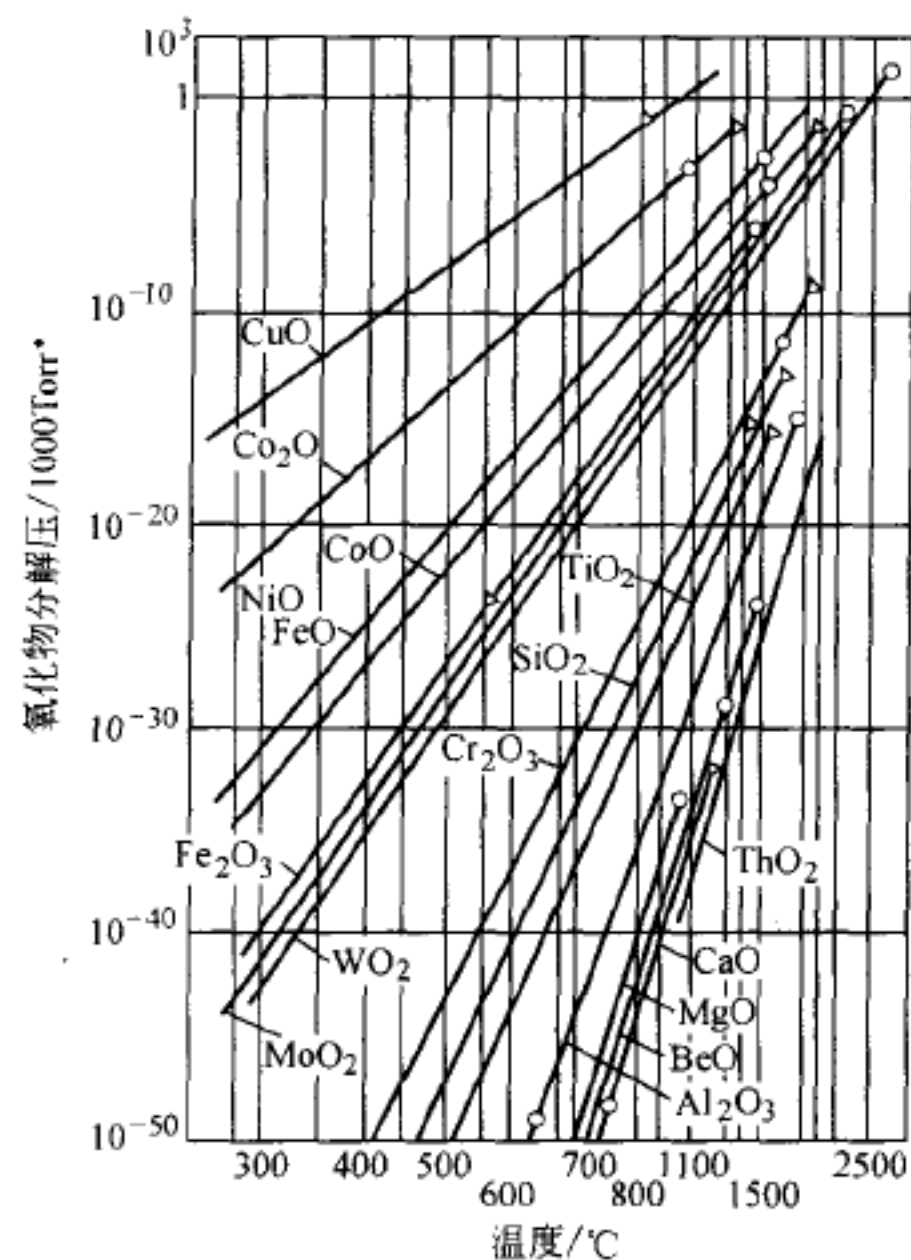


图 6-27 各种金属氧化物的分解压力
(1Torr = 133.32Pa)

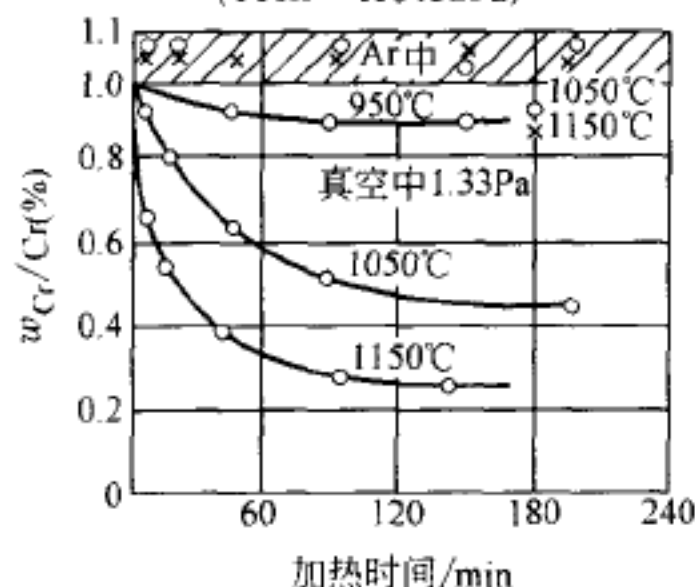


图 6-29 铬在真空中
于不同温度下的蒸发

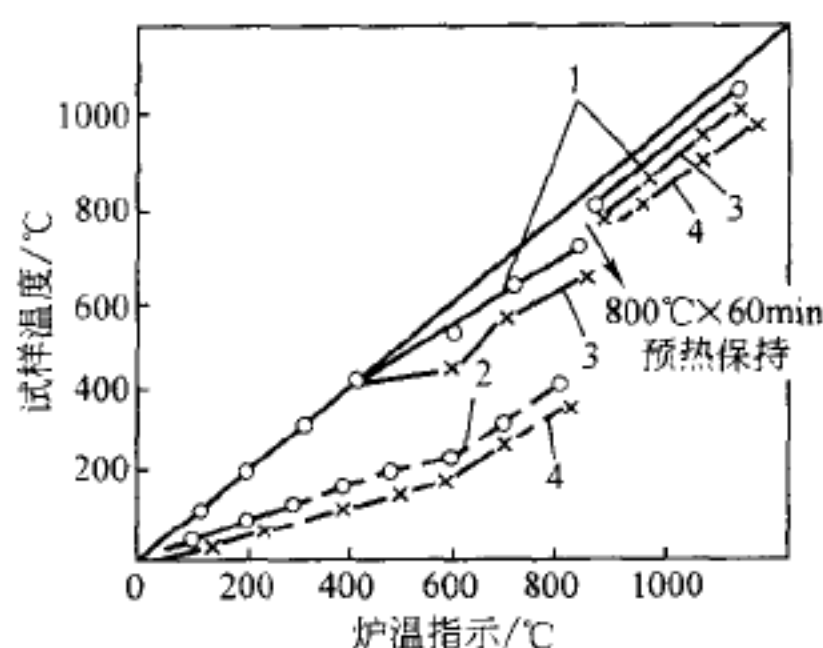


图 6-31 真空加热时，炉温与
试棒温度的关系
1—φ20mm 试棒表面 2—φ20mm 试棒心部
3—φ50mm 试棒表面 4—φ50mm 试棒心部

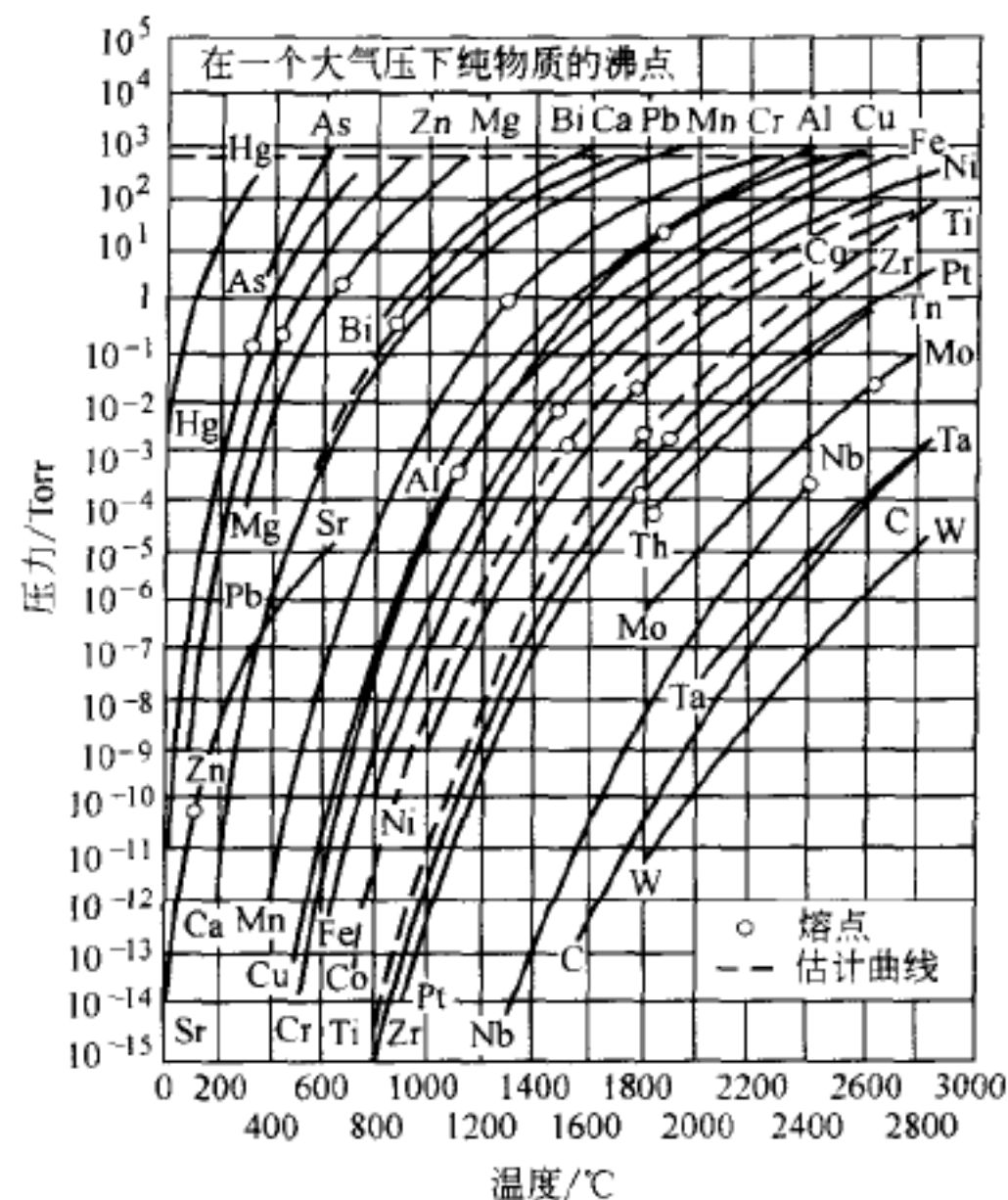


图 6-28 各种金属在不同温度下的蒸气压
(1Torr = 133.32Pa)

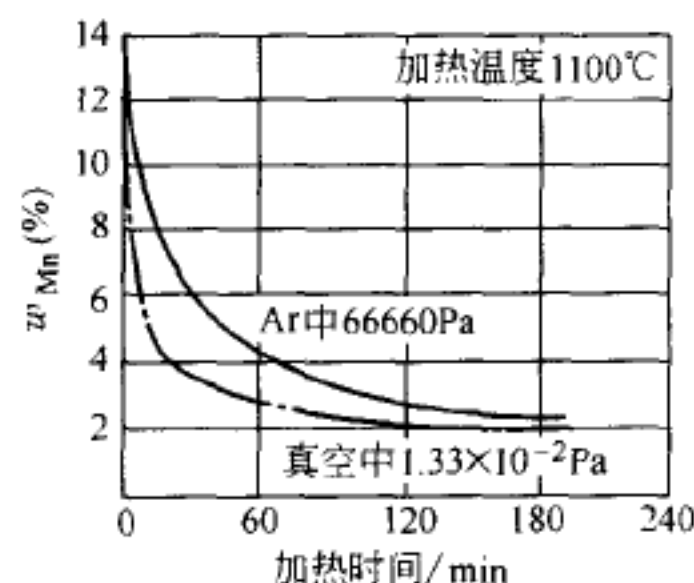


图 6-30 wMn14% 钢
在真空中加热时的锰的蒸发量

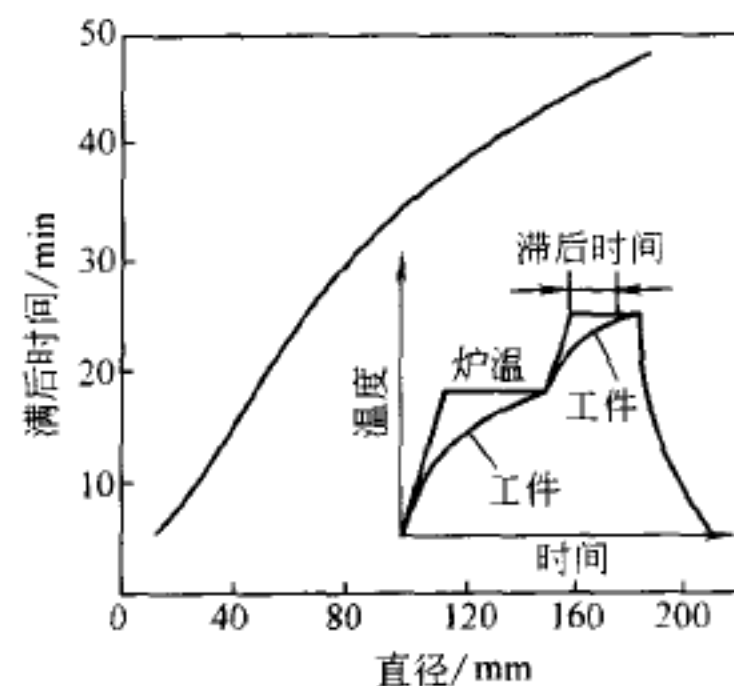
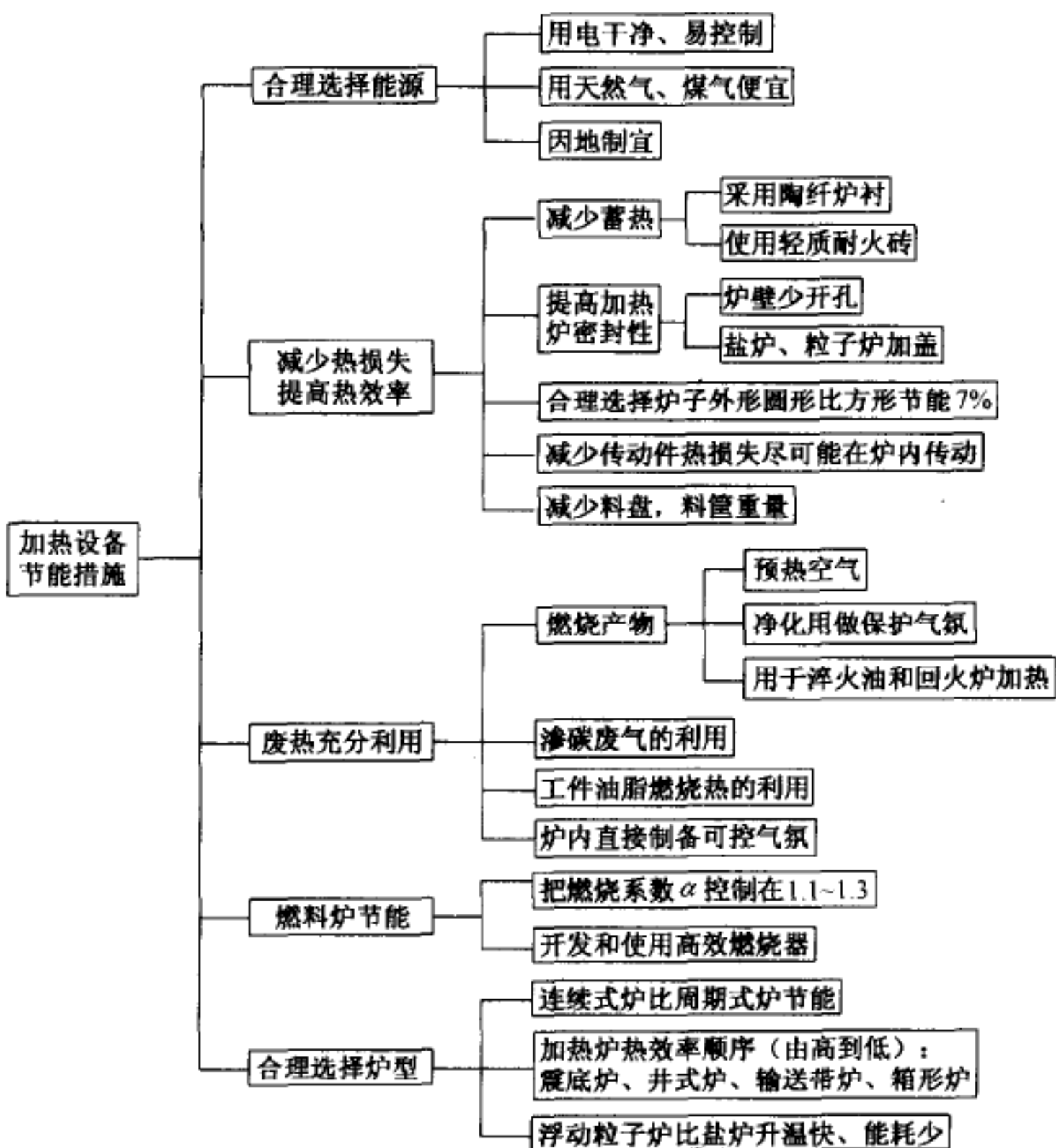
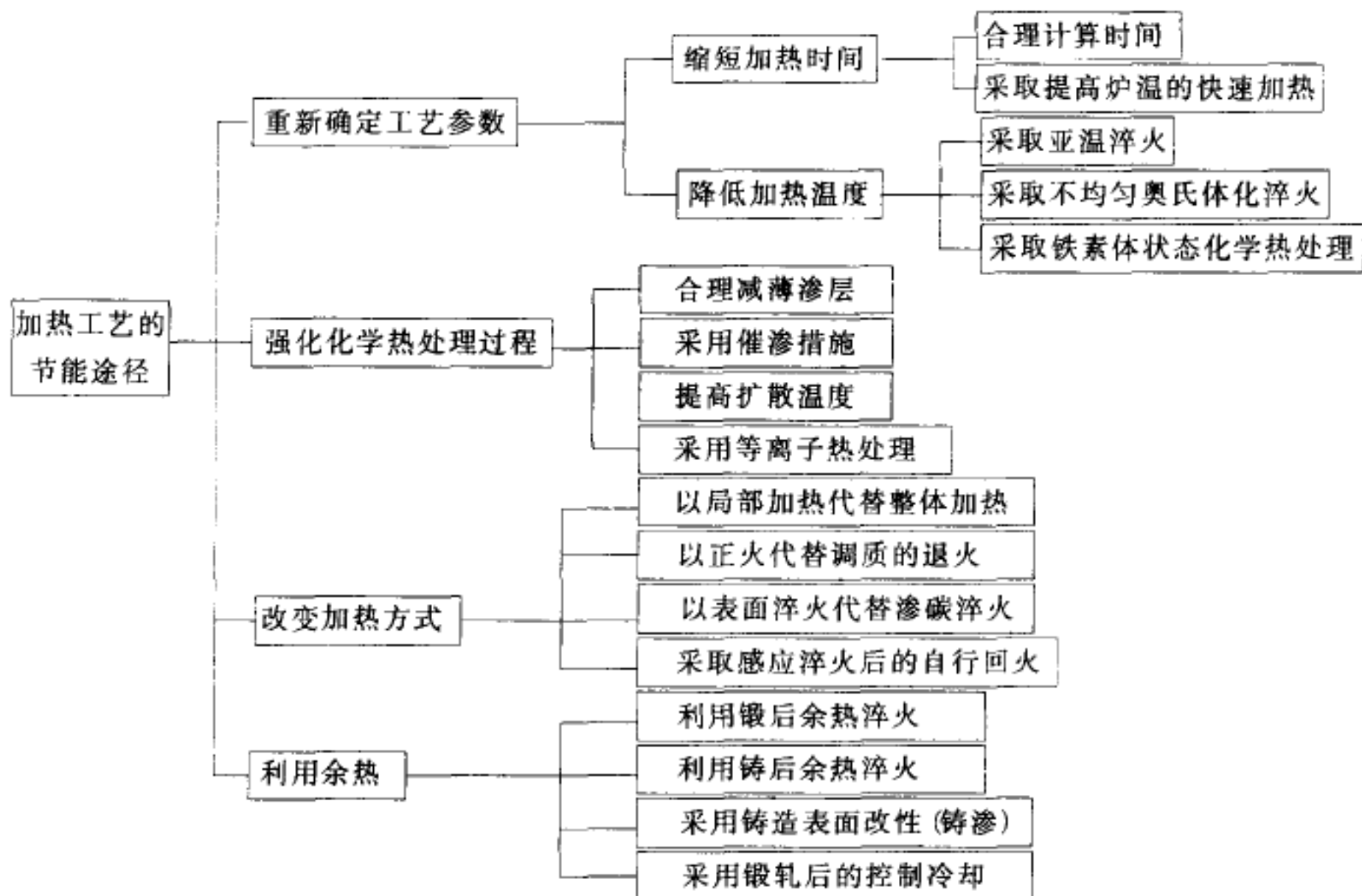


图 6-32 在油淬真空炉中加热时钢的
奥氏体化温度、工件尺寸对炉温和
工件温度滞后时间的影响

6.7 加热工艺和设备的节能途径



6.8 氧化与脱碳

1. 金属在空气中加热 (图 6-33 ~ 图 6-45 和表 6-22、表 6-23)

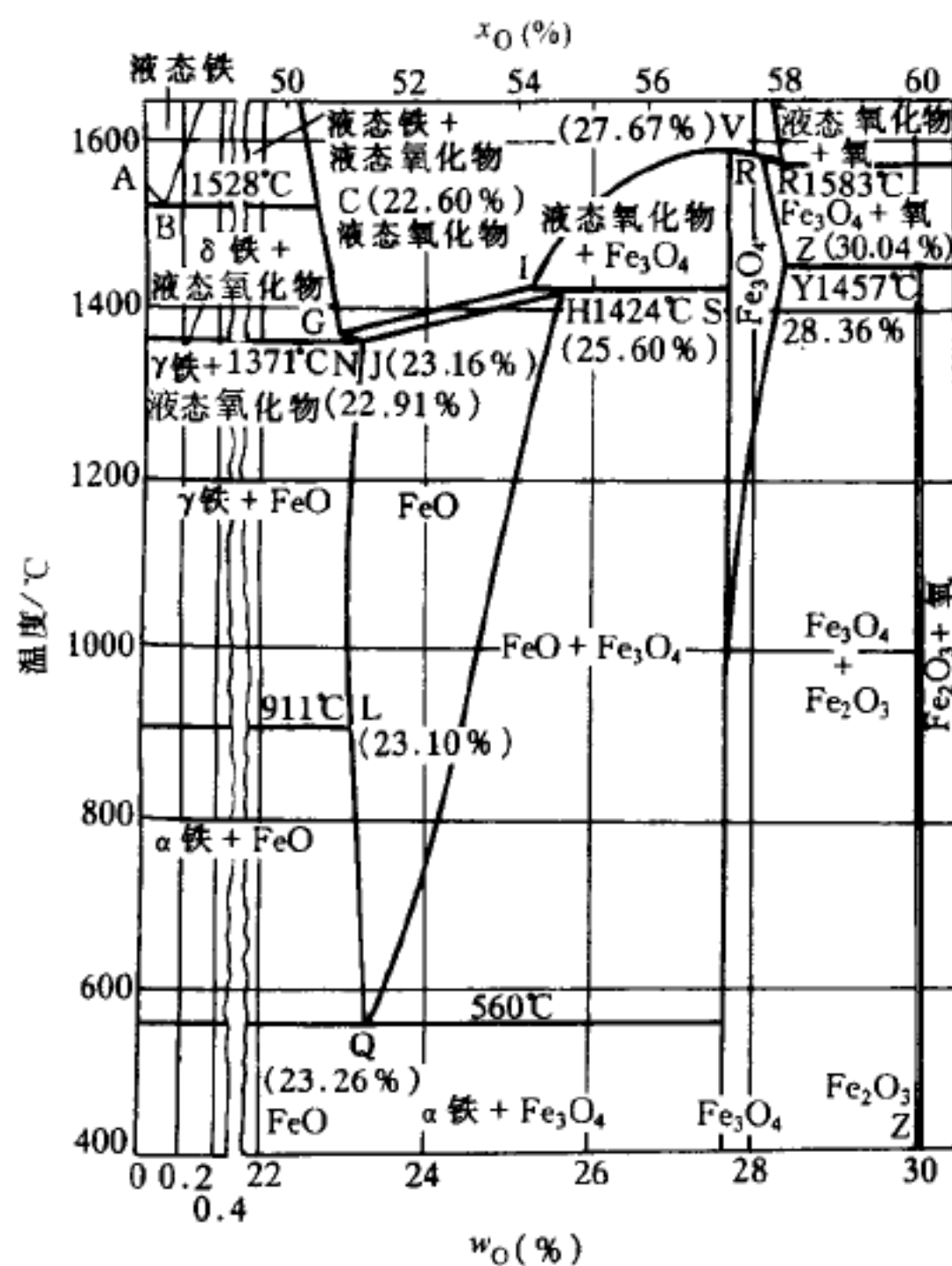


图 6-33 铁-氧平衡相图

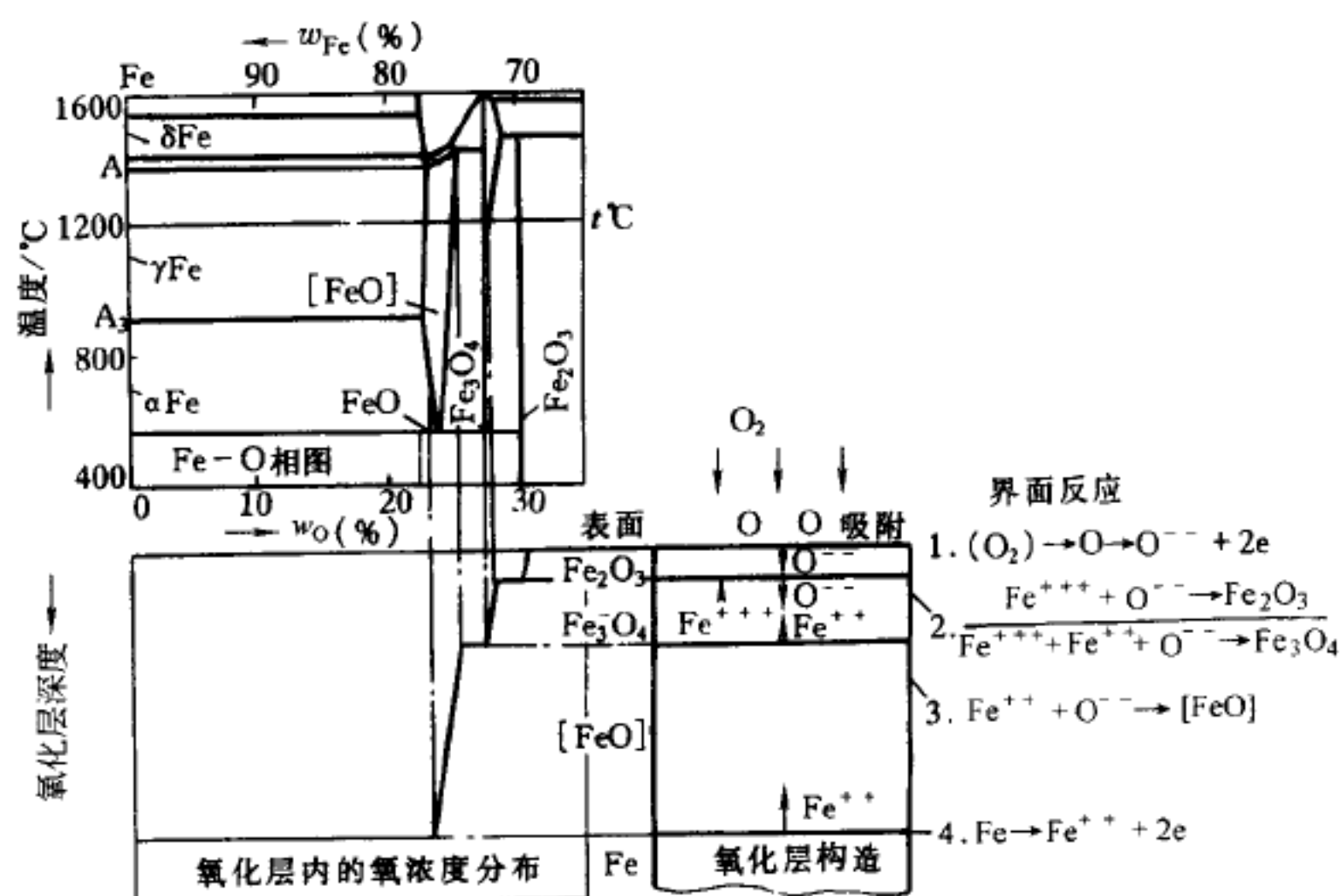


图 6-34 氧化层内的氧浓度分布和氧化过程

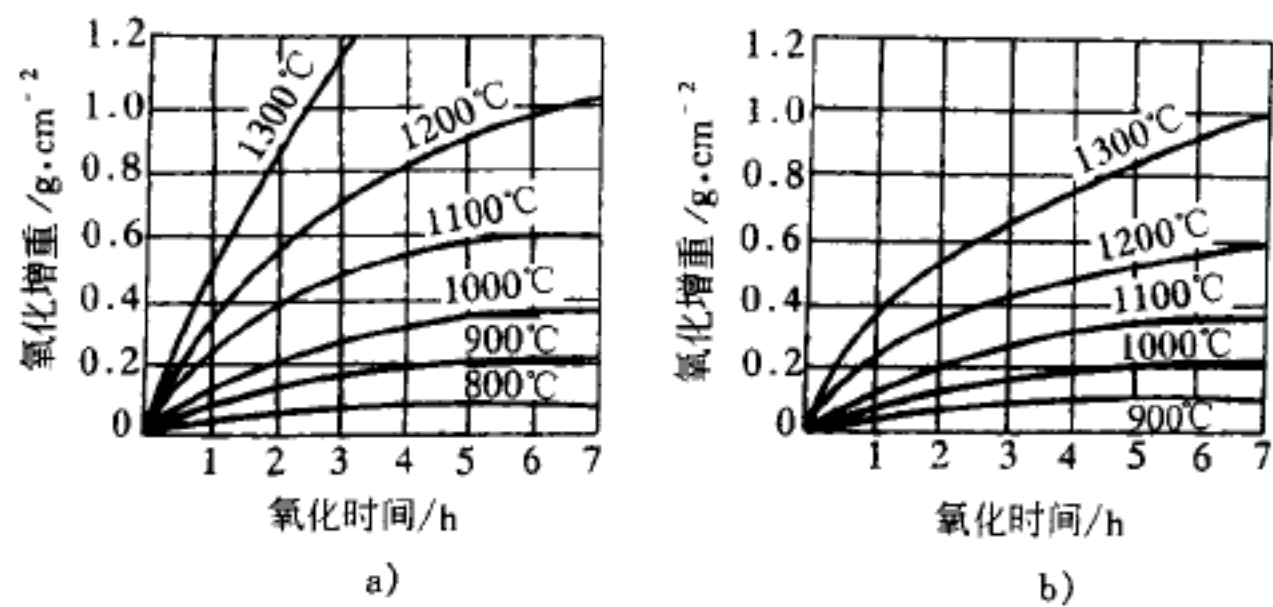


图 6-35 纯铁的氧化增重和温度、时间的关系
a) 在纯氧中 b) 在空气中

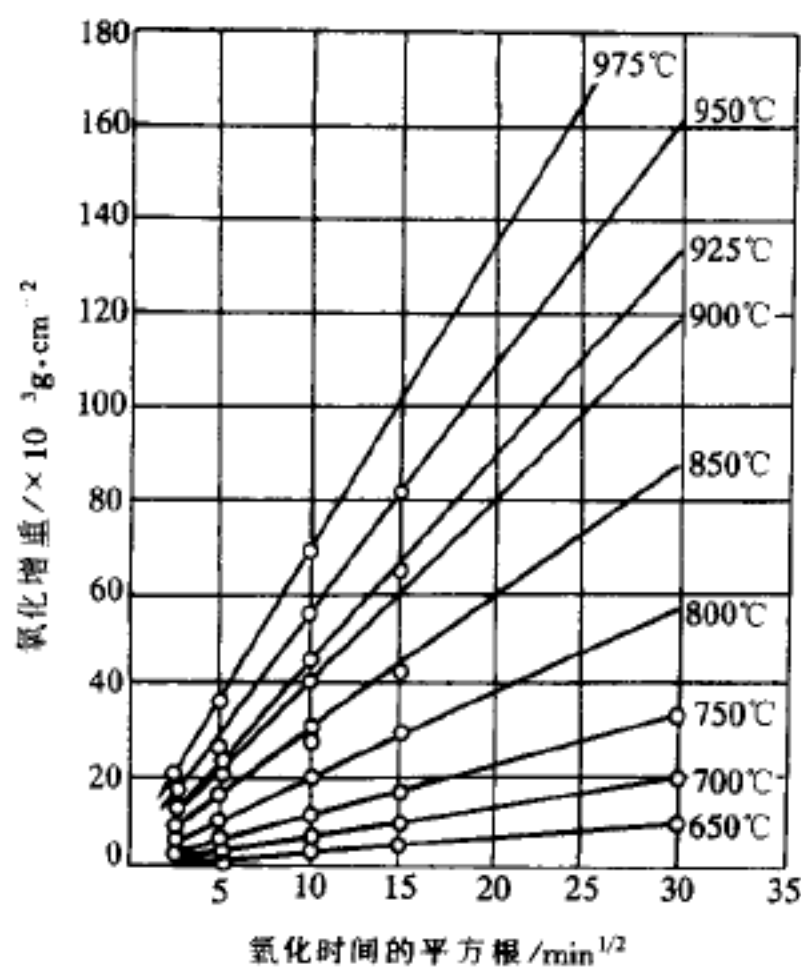


图 6-36 纯铁在氧气中于不同温度下的增重

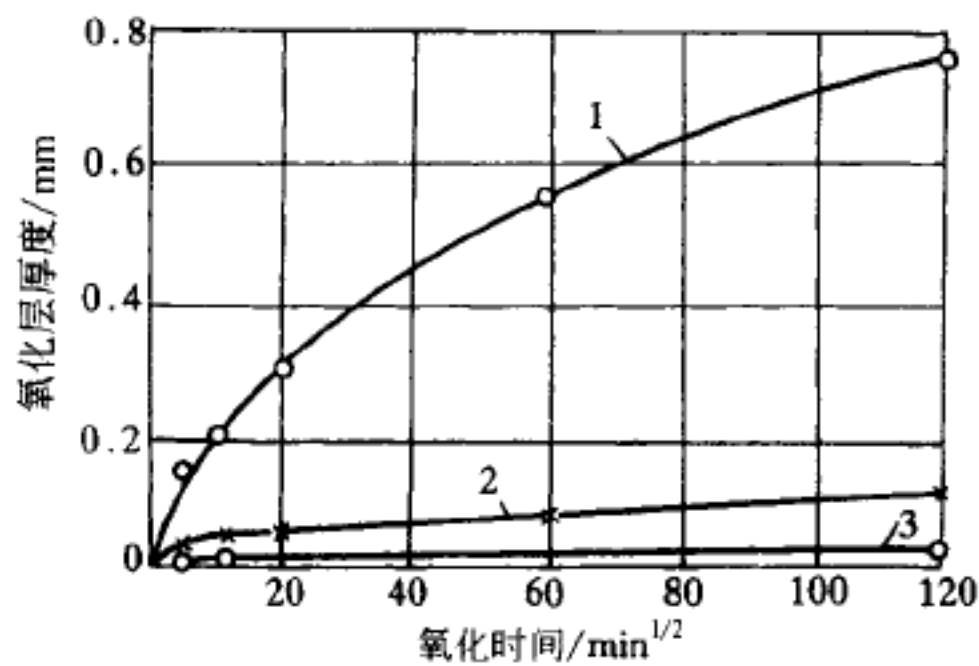


图 6-37 纯铁在 1200℃ 的空气中发生
氧化时各个氧化层的成长曲线
1—内层 FeO 2—外层 Fe₃O₄ 3—最外层 Fe₂O₃

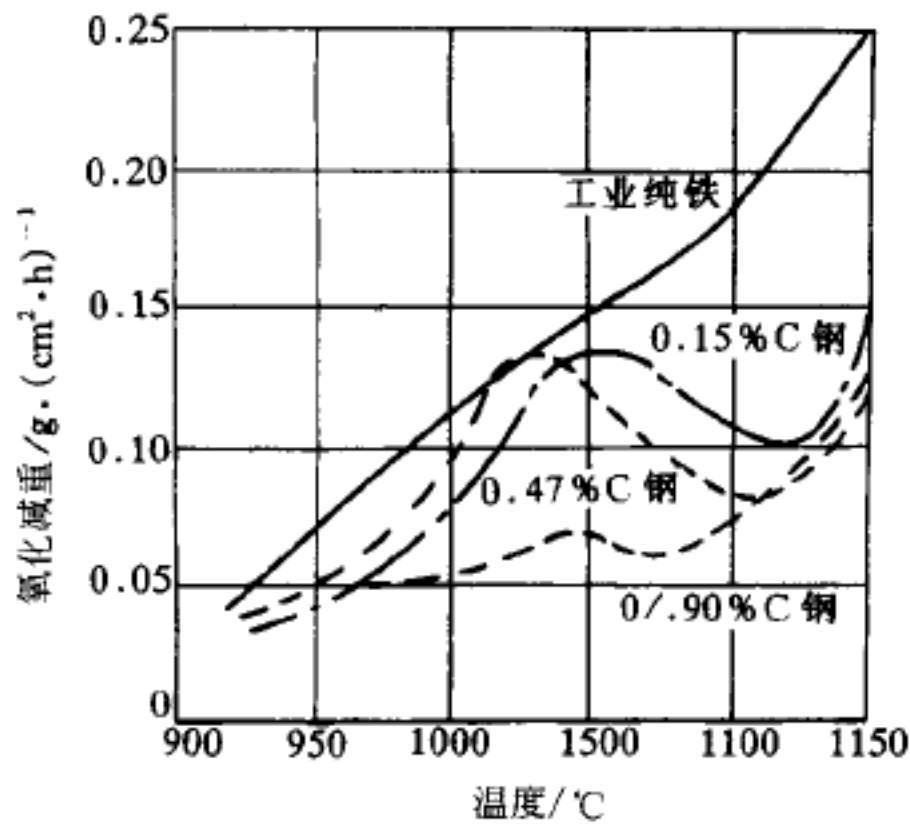


图 6-38 纯铁及各种碳含量 (质量分数)
的钢在空气中加热时的氧化减重

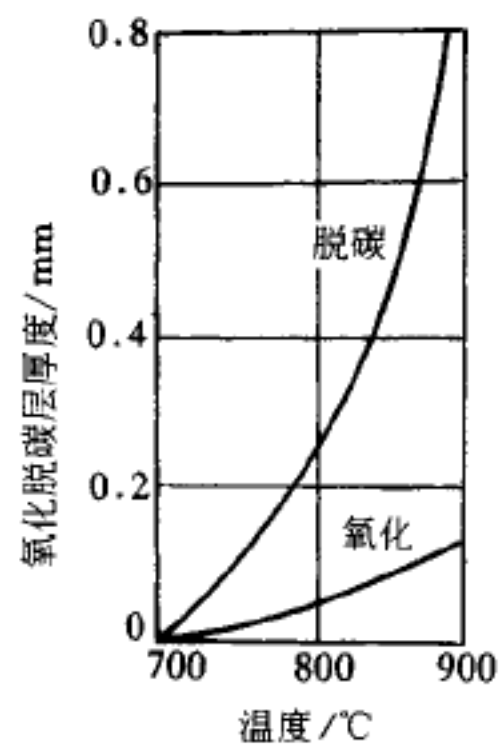


图 6-39 $w_c = 0.85\%$ 碳钢在空气中加热 1h
的氧化脱碳层厚度随温度的变化

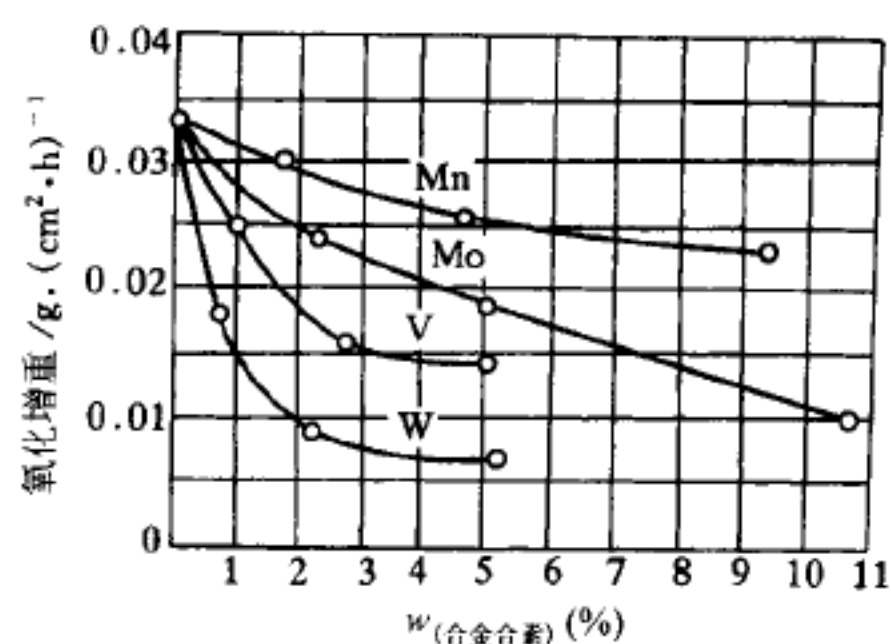


图 6-40 添加 Mn、Mo、W、V 对铁高温氧化增重的影响 (1000°C, 1h)

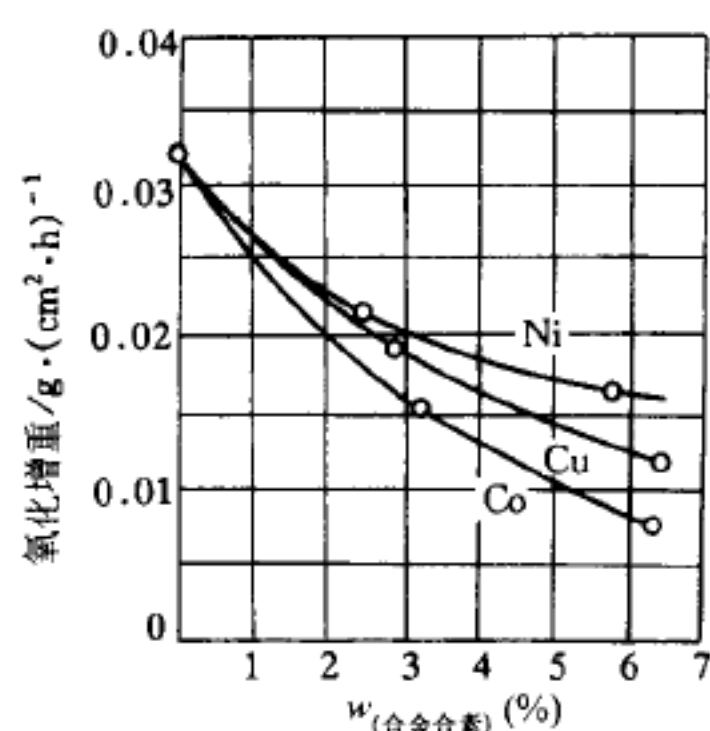
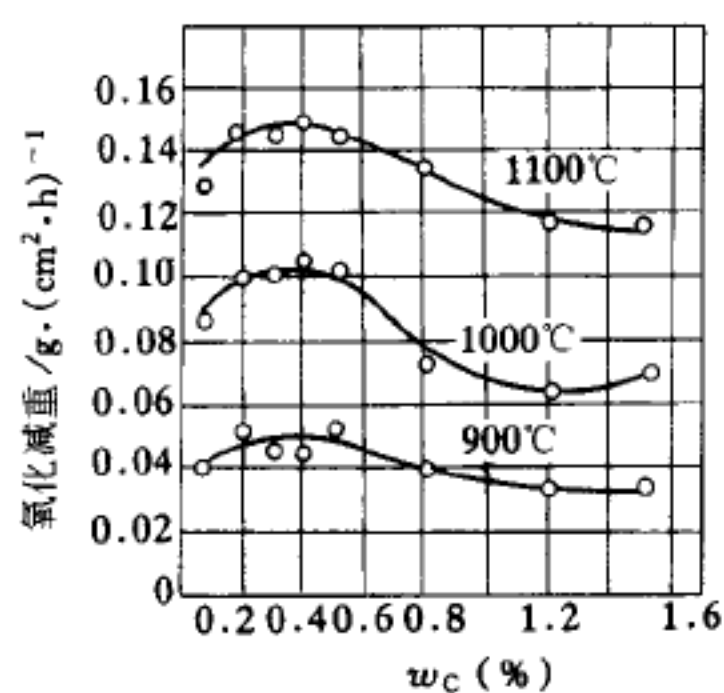
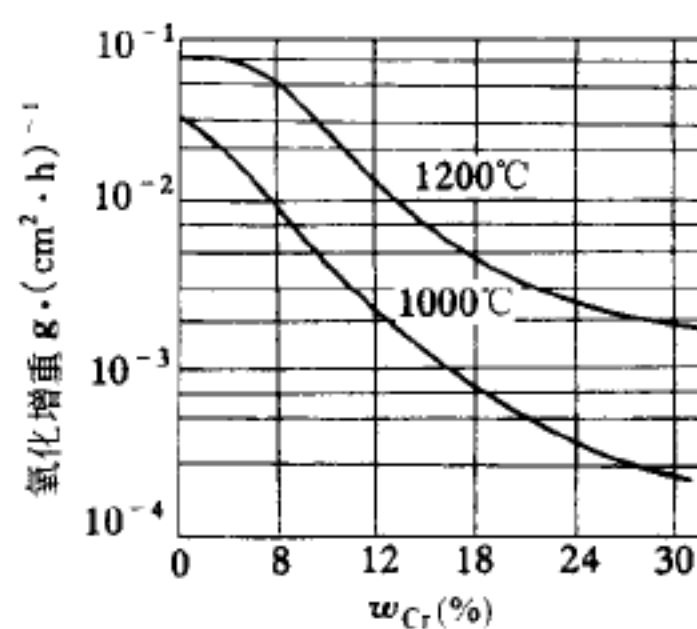


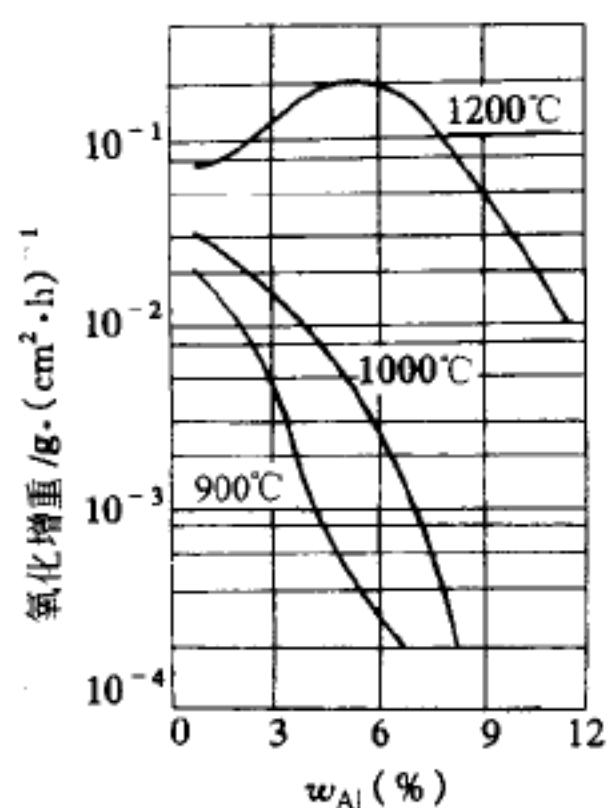
图 6-41 添加 Ni、Cu、Co 对铁高温氧化增重的影响 (1000°C, 1h)



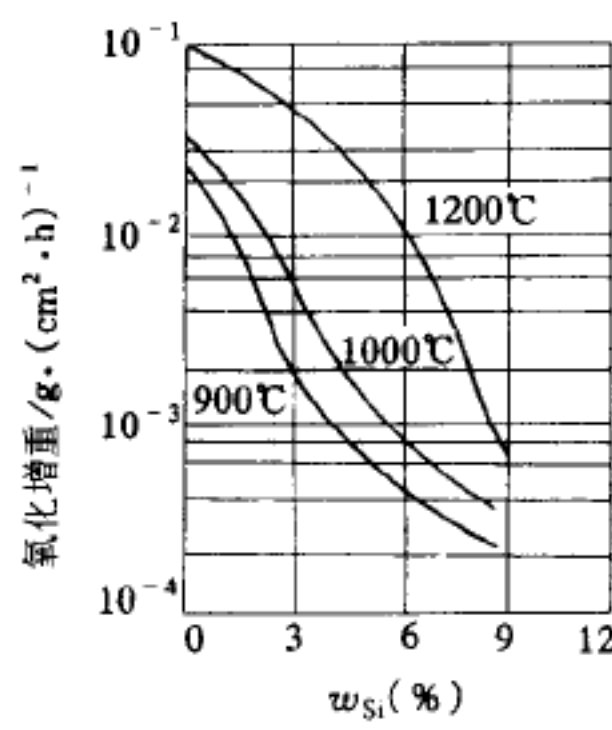
a)



b)



c)



d)

图 6-42 钢中合金元素含量对各温度下在空气中氧化量的影响 (加热 1h)

a) 碳的影响 b) 铬的影响 c) 铝的影响 d) 硅的影响

表 6-22 金属氧化物的晶体点阵和常数

铁的氧化物	金 属 (合 金 元 素)				
	Al	Si	Ti	V	Cr
FeO, 立方点阵 $a = 4.28 \times 10^{-7} \text{ mm}$	—	—	TiO $a = 4.2$	VO $a = 4.081 \times 10^{-7} \text{ mm}$	—
Fe ₃ O ₄ , 立方点阵 $a = 8.38 \times 10^{-7} \text{ mm}$	—	—	—	—	—
γ -Fe ₂ O ₃ , 立方点阵 $a = 8.32 \times 10^{-7} \text{ mm}$	γ -Al ₂ O ₃	—	—	—	γ -Cr ₂ O ₃
α -Fe ₂ O ₃ , 斜方点阵 $a = 5.42 \times 10^{-7} \text{ mm}$ $\alpha = 55^\circ 17'$	α -Al ₂ O ₃ $a = 5.12 \times 10^{-7} \text{ mm}$ $\alpha = 55^\circ 17'$	—	Ti ₂ O ₃ $a = 5.42 \times 10^{-7} \text{ mm}$ $\alpha = 56^\circ 50'$	V ₂ O ₃ $a = 5.45 \times 10^{-7} \text{ mm}$ $\alpha = 55^\circ 49'$	α -Cr ₂ O ₃ $a = 5.35 \times 10^{-7} \text{ mm}$ $\alpha = 55^\circ$
单独类型的氧化物	—	SiO ₂	TiO ₂	VO ₂ V ₂ O ₅	CrO ₃

铁的氧化物	金 属 (合 金 元 素)					
	Mn	Co	Ni	Cu	Mo	Mg
FeO, 立方点阵 $a = 4.28 \times 10^{-7} \text{ mm}$	MnO $a = 4.43 \times 10^{-7} \text{ mm}$	CoO $a = 4.25 \times 10^{-7} \text{ mm}$	NiO $a = 4.17 \times 10^{-7} \text{ mm}$	—	—	MgO $a = 4.205 \times 10^{-7} \text{ mm}$
Fe ₃ O ₄ , 立方点阵 $a = 8.38 \times 10^{-7} \text{ mm}$	Mn ₃ O ₄	Co ₃ O ₄ $a = 8.11 \times 10^{-7} \text{ mm}$	—	—	—	—
γ -Fe ₂ O ₃ , 立方点阵 $a = 8.32 \times 10^{-7} \text{ mm}$	—	—	—	—	—	—
α -Fe ₂ O ₃ , 斜方点阵 $a = 5.42 \times 10^{-7} \text{ mm}$ $\alpha = 55^\circ 17'$	Mn ₂ O ₃	Co ₂ O ₃	—	—	—	—
单独类型的氧化物	MnO ₂	—	—	CuO	MoO ₂ MoO ₃	—

表 6-23 各种金属最低价稳定氧化物的性质

金属	原子价	氧化物	色彩	密 度 /g·cm ⁻³ (室温)	熔点 /℃	电导率 (1000℃) /Ω·cm	离子半径 /× 10 ⁻⁷ mm	氧化物生成热 /× 42J· (g·MPa) ⁻¹	高价氧化物
Cu	I	Cu ₂ O	红	6.00	1230	10 ⁺¹	0.96	+ 43.0	CuO
Ag		Ag ₂ O	黑褐	7.14	300 ^①	—	1.26	+ 7.0	
Be	II	BeO	白	3.02	2530	10 ⁻⁹	0.31	+ 145.3	
Mg		MgO	白	3.65	2800	10 ⁻⁵	0.65	+ 145.8	
Mn		MnO	绿	5.4	1785	10 ⁻¹	0.80	+ 96.7	Mn ₂ O ₄ , Mn ₂ O ₃
Fe		FeO	黑	5.7	1377	10 ⁺²	0.75	+ 64.6	Fe ₃ O ₄ , Fe ₂ O ₃
Ni		NiO	绿黑	7.45	1960	10 ⁻²	0.70	+ 58.4	Ni ₃ O ₄ , Ni ₂ O ₃
Zn		ZnO	白	5.47	2000	10 ⁻¹	0.74	+ 83.3	
Al	III	Al ₂ O ₃	白	3.99	2050	10 ⁻⁷	0.50	+ 126.9	
Cr		Cr ₂ O ₃	绿	5.21	2275	10 ⁻³	0.64	+ 96.3	(CrO)
Si		SiO ₂	白	2.32	1710	10 ⁻⁶	0.41	+ 102.8	(SiO)
Ti		TiO ₂	白	4.16	1825	10 ⁻⁴	0.68	+ 109.0	(Ti ₂ O ₃)
Zr		ZrO ₂	白	5.73	2680	—	0.80	+ 129.0	
Mo		MoO ₂	红紫	4.52	(800) ^②	—	0.66	+ 71.4	MoO ₃
W		WO ₂	褐	12.11	1277	—	0.66	+ 65.7	WO ₃

① 分解。

② 气化 (MoO₂) 的数值。

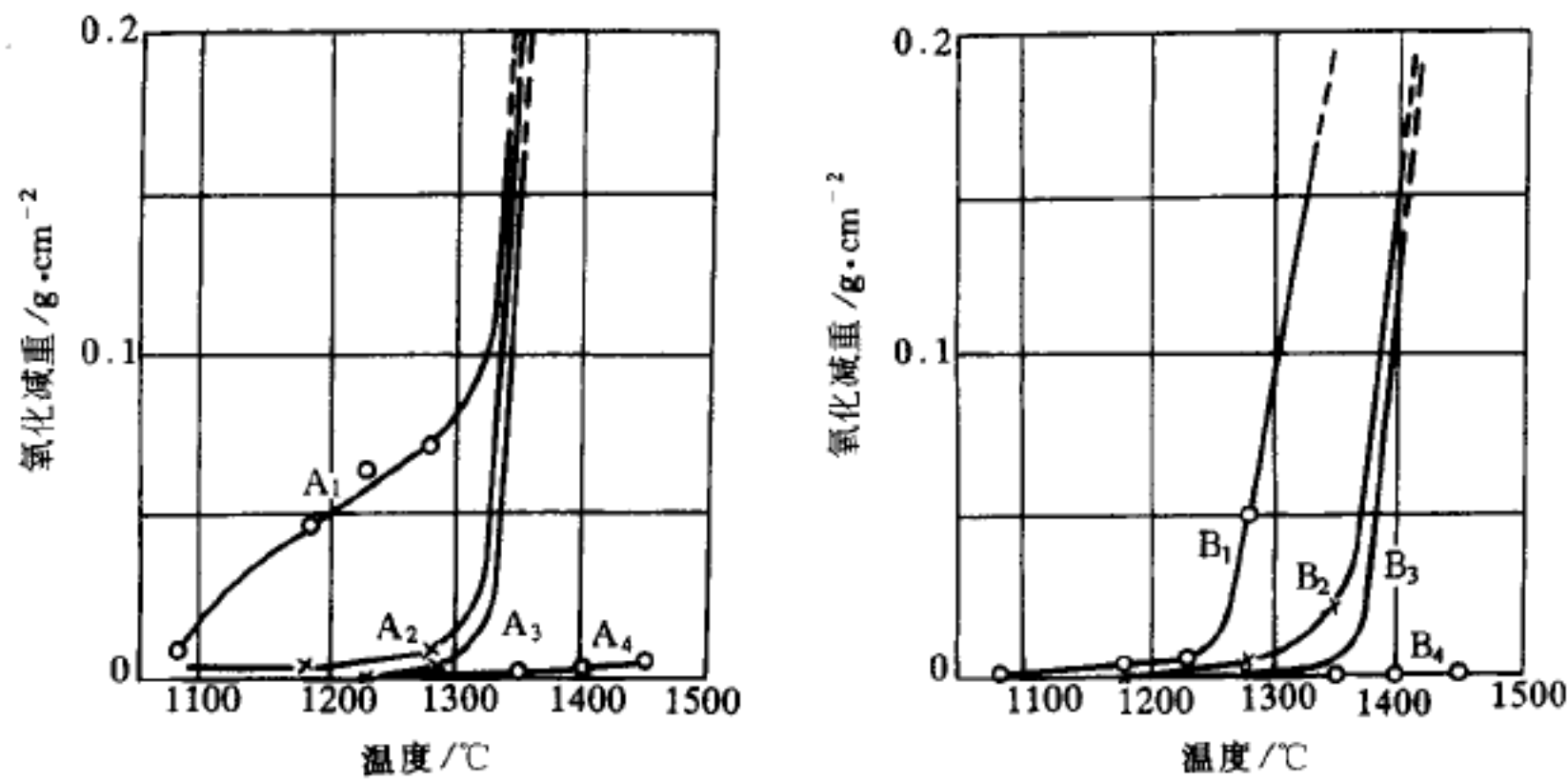


图 6-43 各种 Fe-Cr-Al 合金在不同温度下加热 10min 的氧化减重
A₁—w_{Cr}5.0%, w_{Al}1.37% A₂—w_{Cr}9.5%, w_{Al}1.33% A₃—w_{Cr}15.02%, w_{Al}1.11%
A₄—w_{Cr}19.39%, w_{Al}1.30% B₁—w_{Cr}4.15%, w_{Al}3.39% B₂—w_{Cr}7.49%, w_{Al}2.99%
B₃—w_{Cr}12.81%, w_{Al}13.26% B₄—w_{Cr}17.20%, w_{Al}3.46%

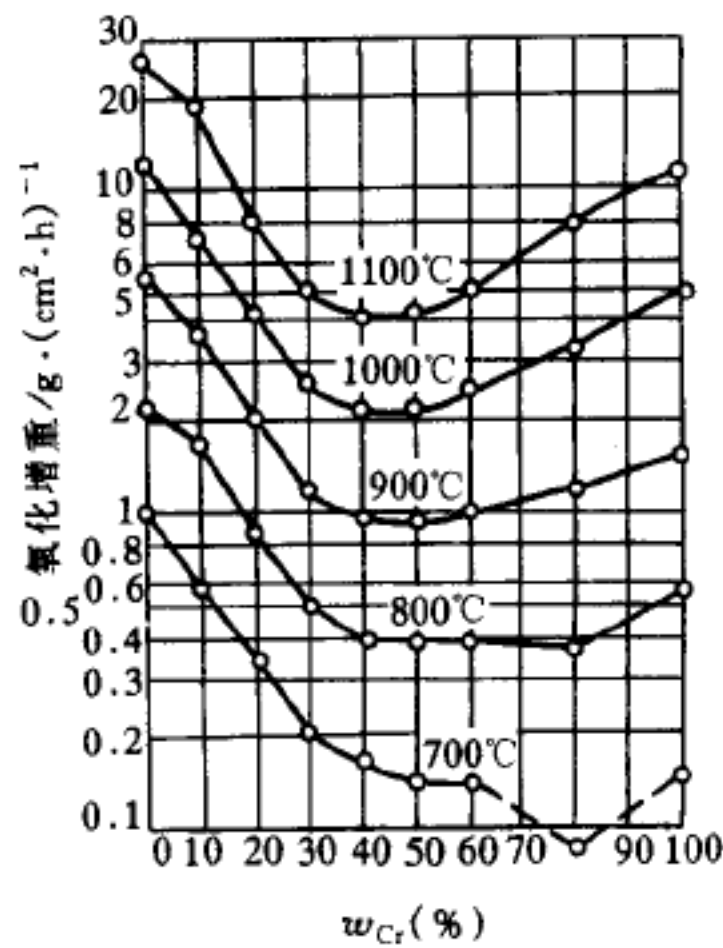


图 6-44 镍铬合金的高温氧化增重和含铬量的关系

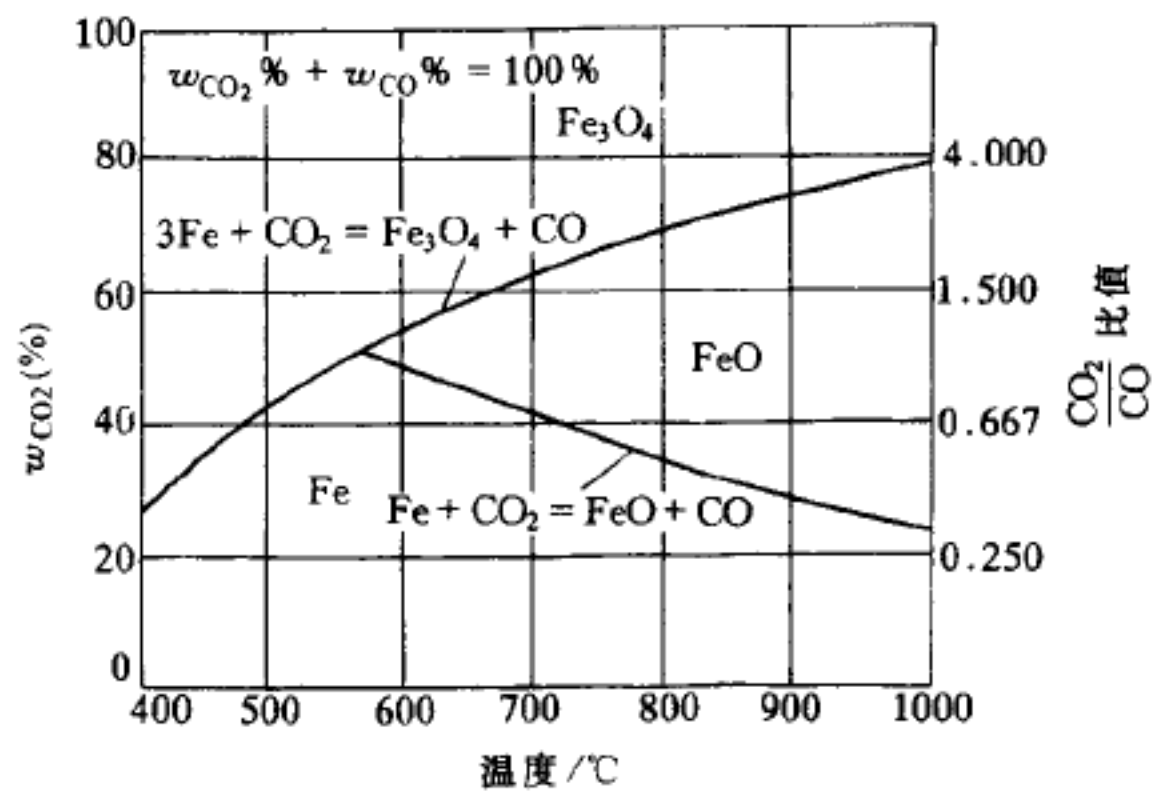


图 6-45 铁在 CO-CO₂ 气氛中于各种温度下生成氧化铁的平衡曲线

2. 金属在氧化—还原气氛中加热 (表 6-24 和图 6-46 ~ 图 6-66)

表 6-24 不同温度下的反应平衡常数

温度 / °C	$K_1 = \frac{p_{H_2}}{p_{H_2O}}$	$K_2 = \frac{p_{CO}}{p_{CO_2}}$	$K_3 = \frac{p_{H_2} \times p_{CO_2}}{p_{H_2O} \times p_{CO}}$	$K_4 = \frac{p_{CO}^2}{p_{CO_2}}$	$K_5 = \frac{p_{H_2}^2}{p_{CH_4}}$	$K_6 = \frac{p_{H_2} \times p_{CO}}{p_{H_2O}}$	$K_7 = \frac{p_{CO} \times p_{H_2}^3}{p_{H_2O} \times p_{CH_4}}$	$K_8 = \frac{p_{CO}^2 \times p_{H_2}^3}{p_{CO_2} \times p_{CH_4}}$
400	9.12 ^①	0.74 ^①	12.3	9×10^{-5}	5.66×10^{-2}	1.1×10^{-3}	6.23×10^{-5}	5.05×10^{-7}
450	6.38 ^①	0.86 ^①	7.38	7.3×10^{-4}	0.164	5.4×10^{-3}	0.89×10^{-3}	1.19×10^{-4}
500	4.68 ^①	0.96 ^①	4.88	4.7×10^{-3}	0.422	2.3×10^{-2}	0.97×10^{-2}	1.98×10^{-3}
550	3.53 ^①	1.03 ^①	3.45	0.023	0.977	0.079	0.077	0.022
600	2.99	1.17	2.55	0.096	2.09	0.245	0.512	0.201
650	2.65	1.35	1.96	0.343	3.92	0.672	2.63	1.34
700	2.38	1.53	1.56	1.06	7.16	1.65	11.8	7.59
750	2.17	1.72	1.27	2.96	12.3	3.76	46.2	36.4
800	2.00	1.90	1.05	7.48	20.1	7.85	157.8	152
850	1.84	2.07	0.891	17.46	31.8	15.5	492.9	558

(续)

温度 /°C	$K_1 = \frac{p_{H_2}}{p_{H_2O}}$	$K_2 = \frac{p_{CO}}{p_{CO_2}}$	$K_3 = \frac{p_{H_2} \times p_{CO_2}}{p_{H_2O} \times p_{CO}}$	$K_4 = \frac{p_{CO}^2}{p_{CO_2}^2}$	$K_5 = \frac{p_{H_2}^2}{p_{CH_4}^2}$	$K_6 = \frac{p_{H_2} \times p_{CO}}{p_{H_2O}}$	$K_7 = \frac{p_{CO} \times p_{H_2}^3}{p_{H_2O} \times p_{CH_4}}$	$K_8 = \frac{p_{CO}^2 \times p_{H_2}^3}{p_{CO_2} \times p_{CH_4}}$
900	1.72	2.24	0.765	37.76	48.3	28.8	1391	1820
950	1.61	2.41	0.668	76.70	71.0	51.2	3635	5430
1000	1.51	2.57	0.589	146.5	102.4	86.3	8837	1.49×10^4
1050	1.44	2.72	0.527	264.0	141.2	139.1	1.96×10^4	3.72×10^4
1100	1.37	2.88	0.474	463.4	192.0	219.2	4.21×10^4	8.90×10^4
1150	1.31	3.03	0.433	767.4	256.0	332.3	8.51×10^4	1.96×10^5
1200	1.26	3.21	0.395	1244	335.0	419.4	1.65×10^5	4.17×10^5
1250	1.22	3.36	0.363	1945	431.5	706.0	3.05×10^5	8.40×10^5
1300	1.18	3.49	0.339	2951	547.0	1000	5.47×10^5	1.62×10^6

① 在此温度下的稳定氧化物是 Fe_3O_4 ，而非 FeO 。

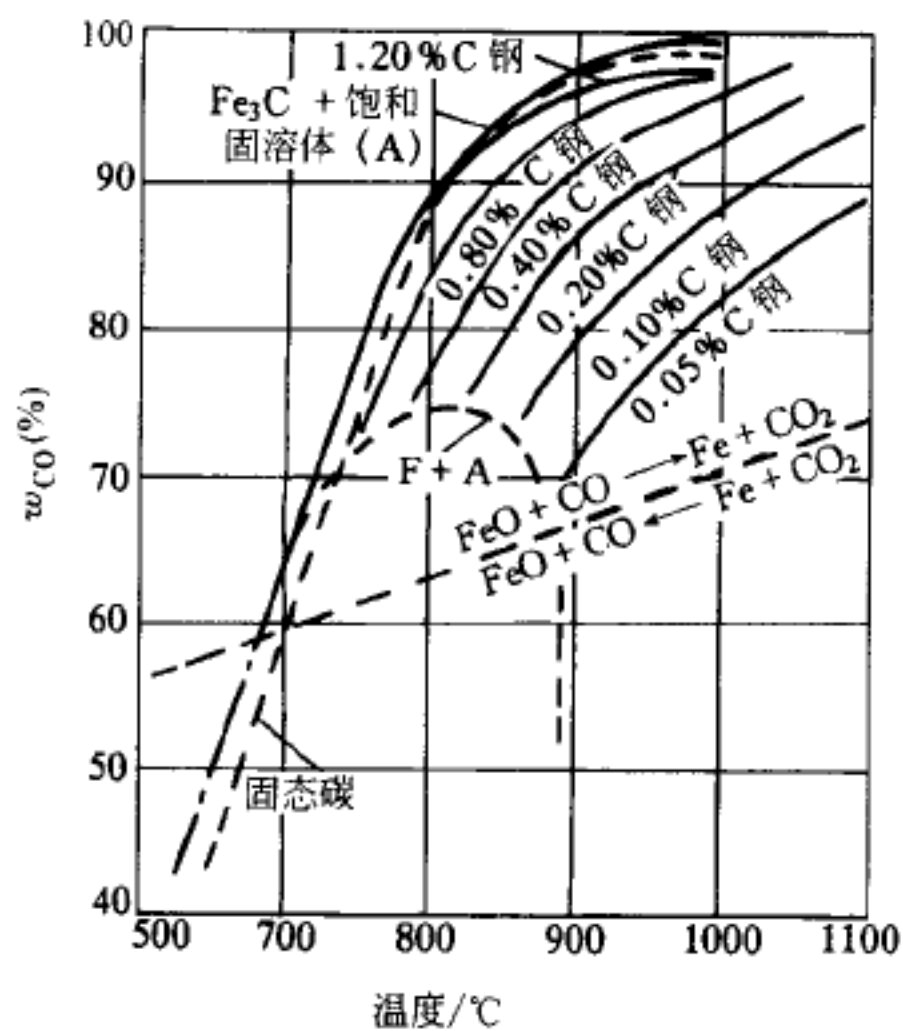


图 6-46 CO-CO₂ 气氛和钢的平衡曲线

($p_{CO} + p_{CO_2} = 0.1\text{MPa}$, 碳含量均为质量分数)

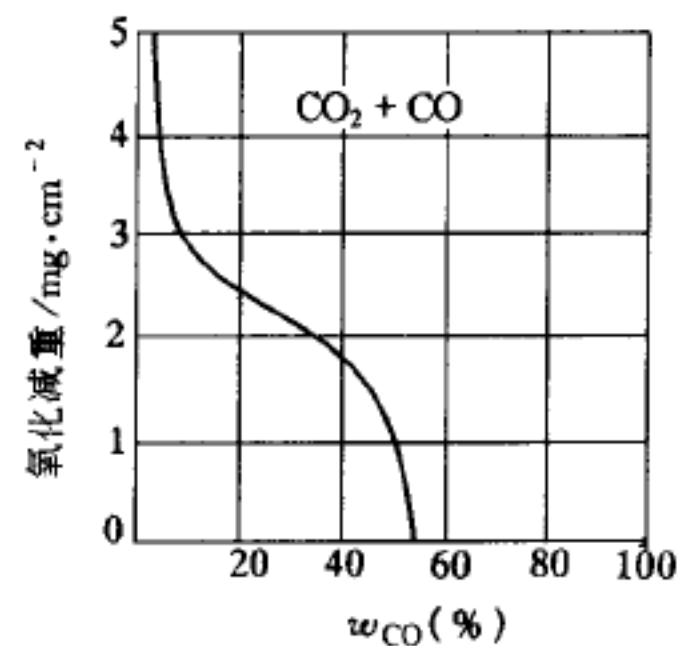


图 6-47 低碳钢在 $CO_2 + CO$ 混合气体中于 1000°C 加热 3h 的氧化损失量

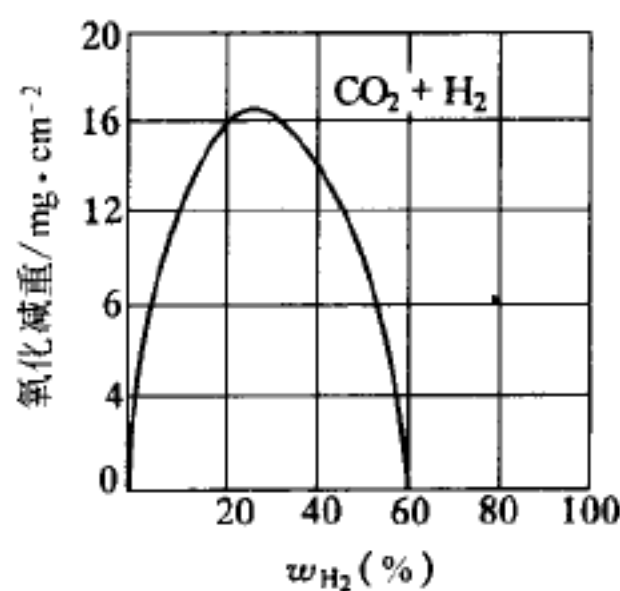


图 6-48 低碳钢在 $CO_2 + H_2$ 混合气体中于 1000°C 加热 3h 的氧化损失量

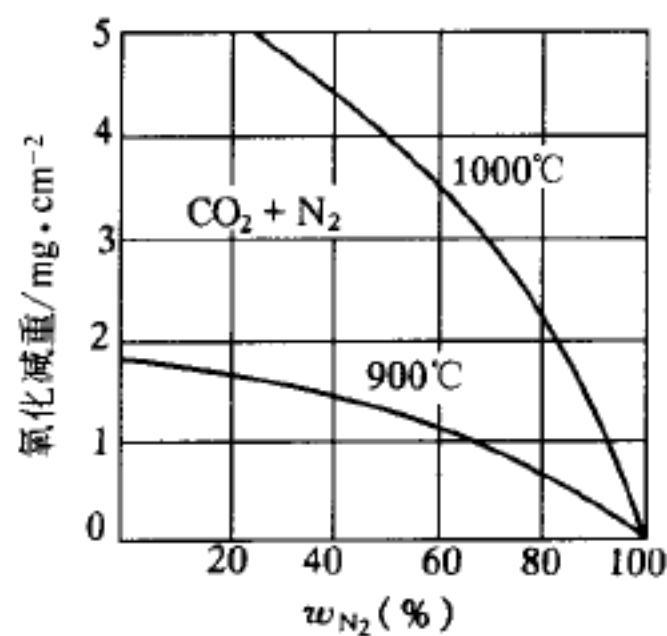


图 6-49 低碳钢在 $CO_2 + N_2$ 混合气体中加热 3h 的氧化损失量

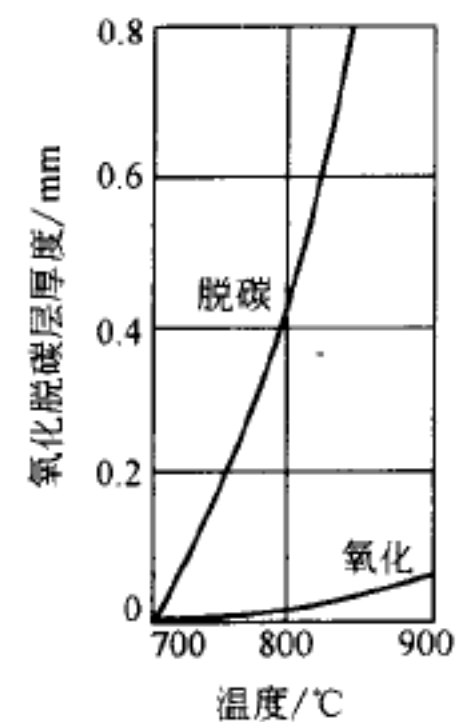


图 6-50 $w_C 0.85\%$ 钢在 CO_2 中加热 1h 的氧化与脱碳层厚度随温度的变化

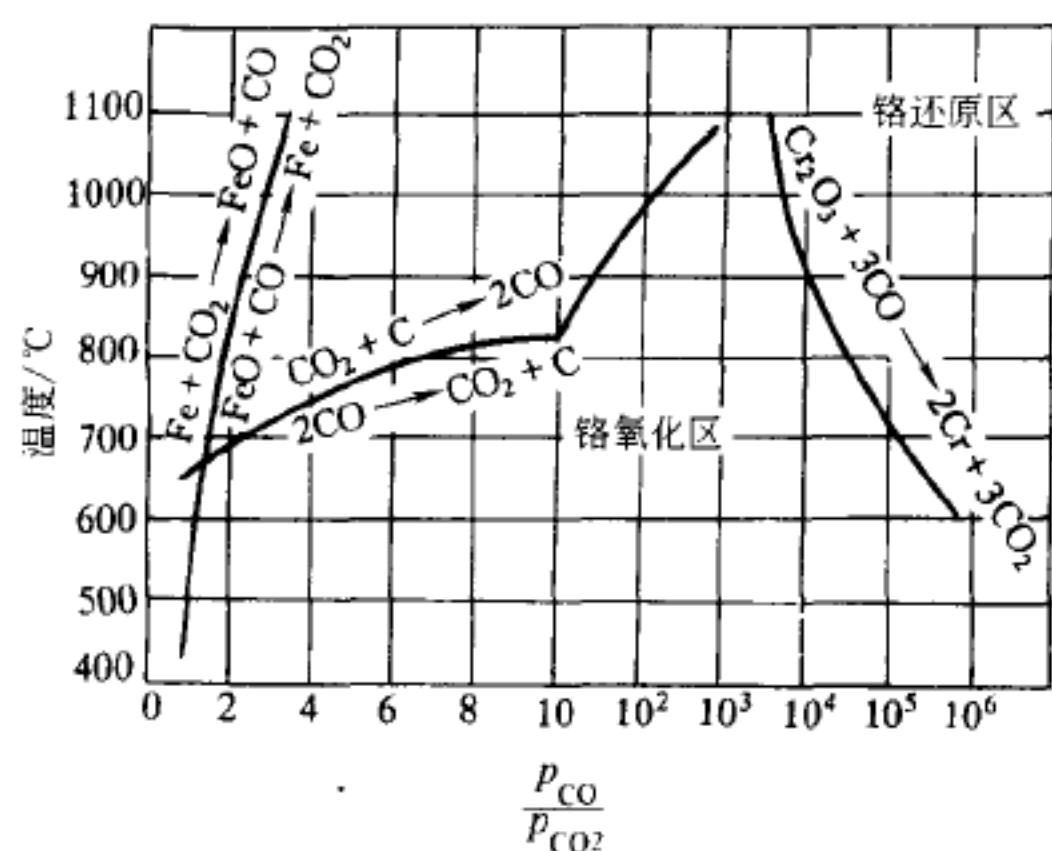
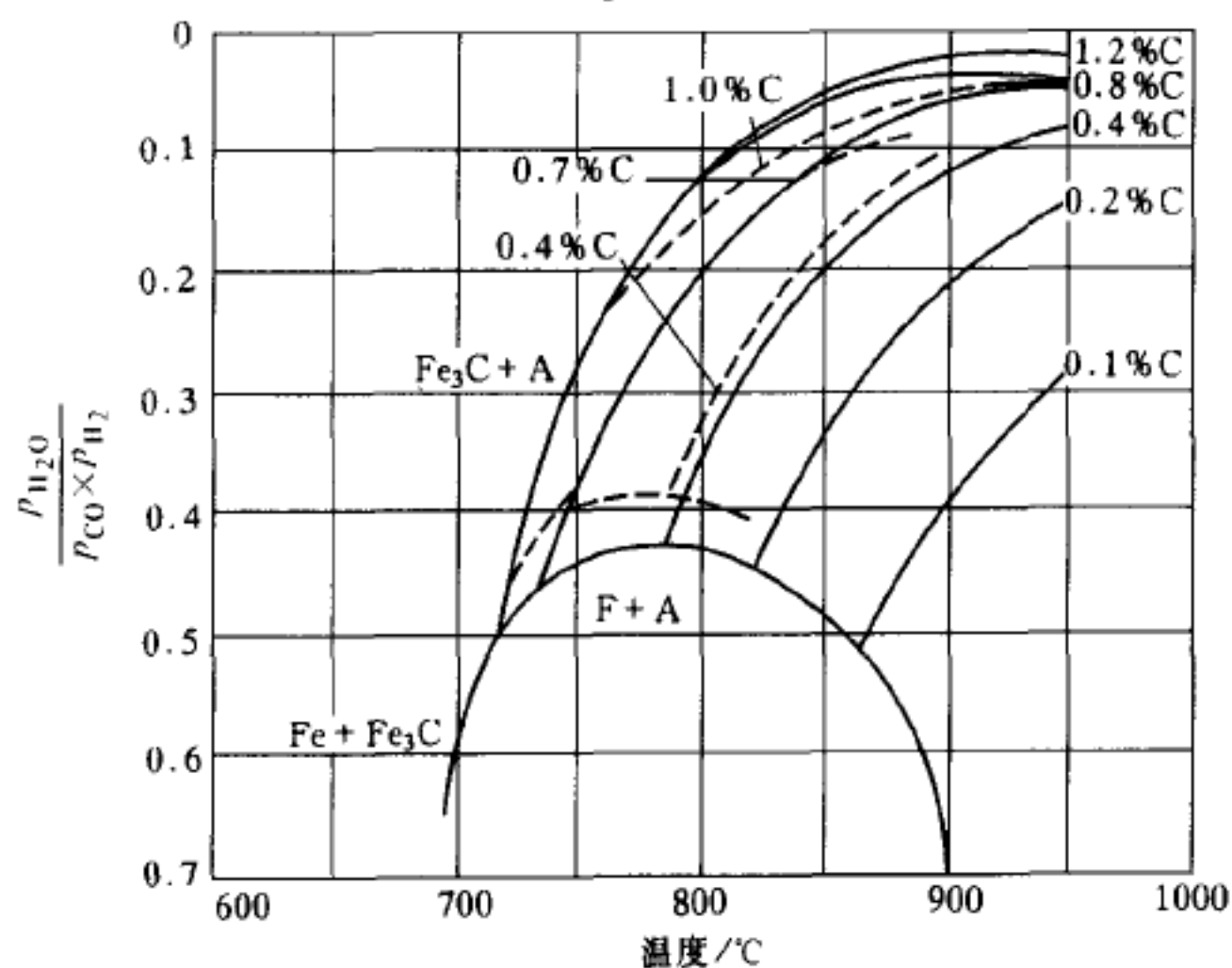


图 6-51 CO-CO₂ 气氛和铁铬的平衡曲线

$$p_{\text{CO}} - \text{CO 在气体中的分压} \quad p_{\text{CO}_2} - \text{CO}_2 \text{ 在气体中的分压}$$
图 6-53 钢在 H_2 - H_2O - CO 气氛中加热时的平衡相图

-----实验数据 ——计算数据
(碳含量均为质量分数)

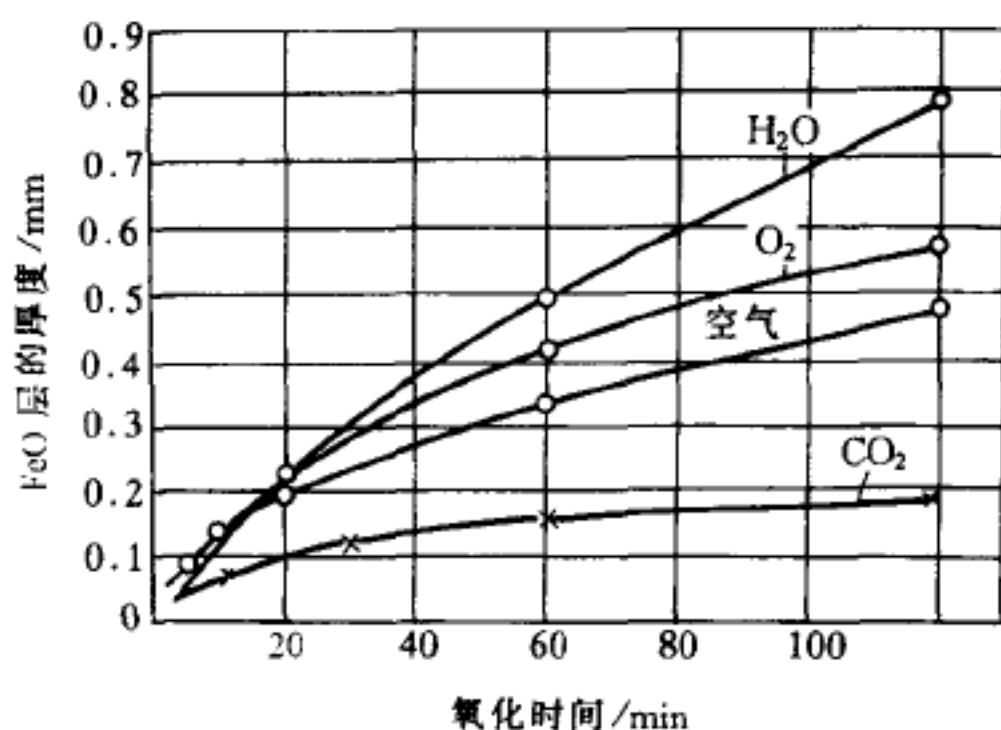


图 6-55 纯铁在 1000℃于各种气体中加热时, FeO 厚度与时间的关系

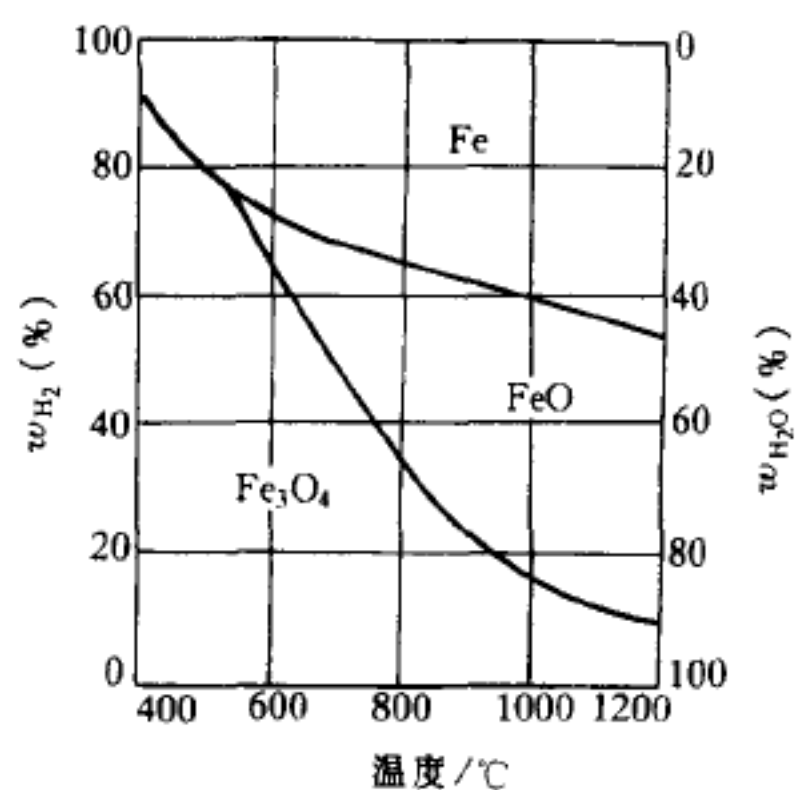


图 6-52 Fe-H₂-H₂O 和铁的平衡相图

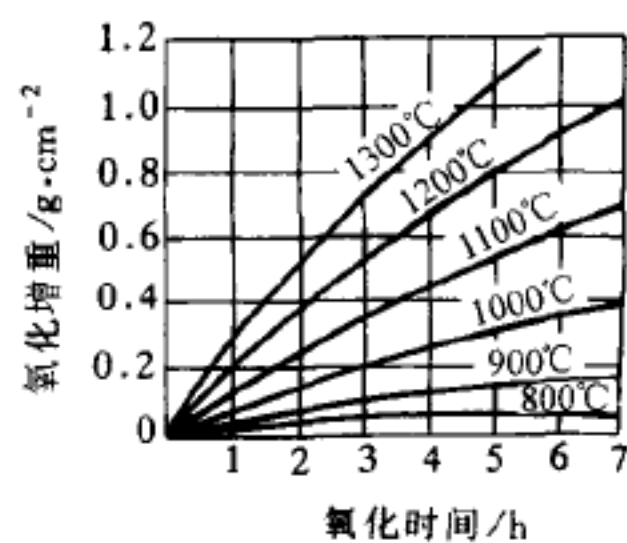


图 6-54 纯铁在水蒸气中于各温度下的氧化增重与时间的关系

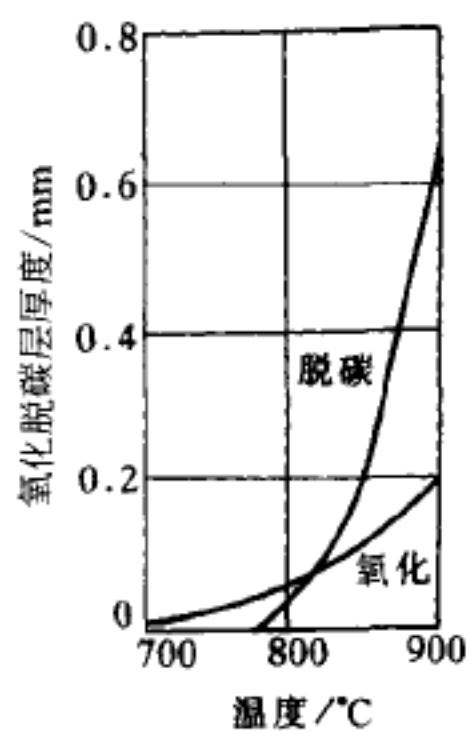


图 6-56 $w_c 0.85\%$ 钢在水蒸气中加热 1h 的氧化脱碳层厚度随温度的变化

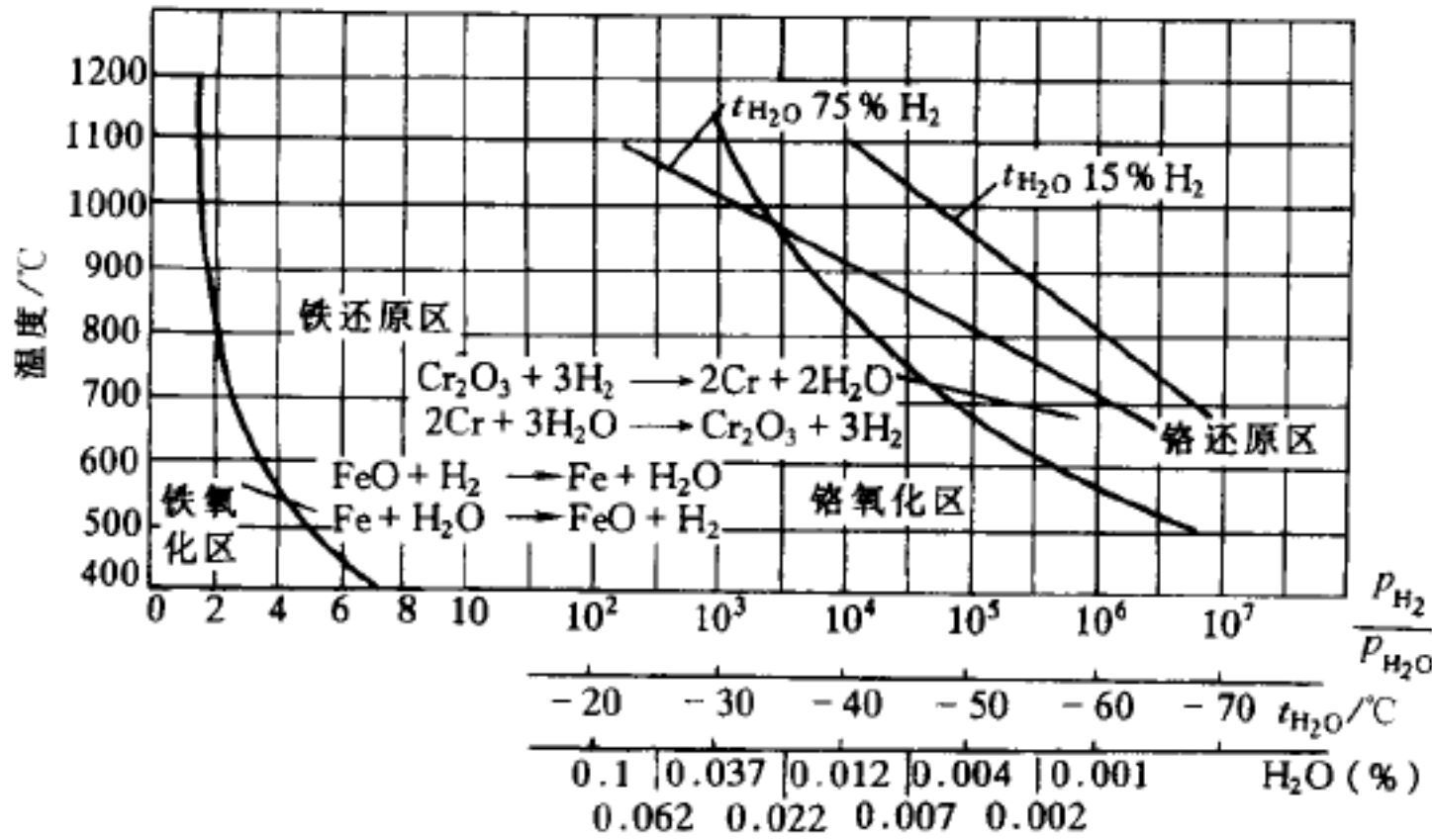
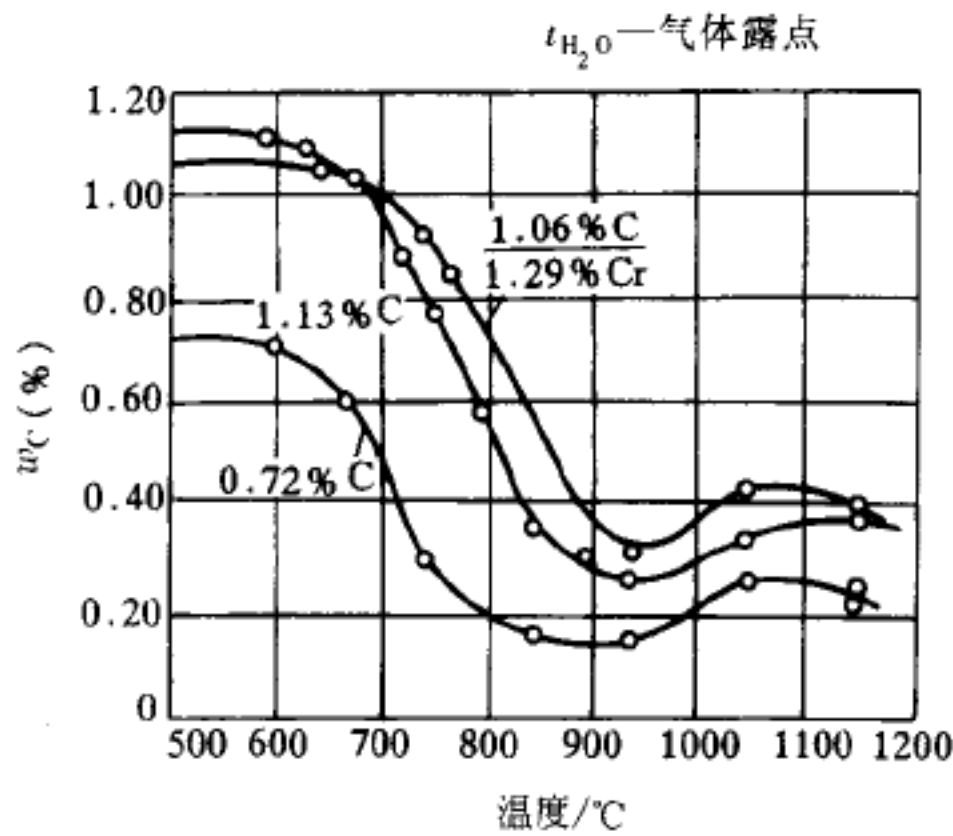
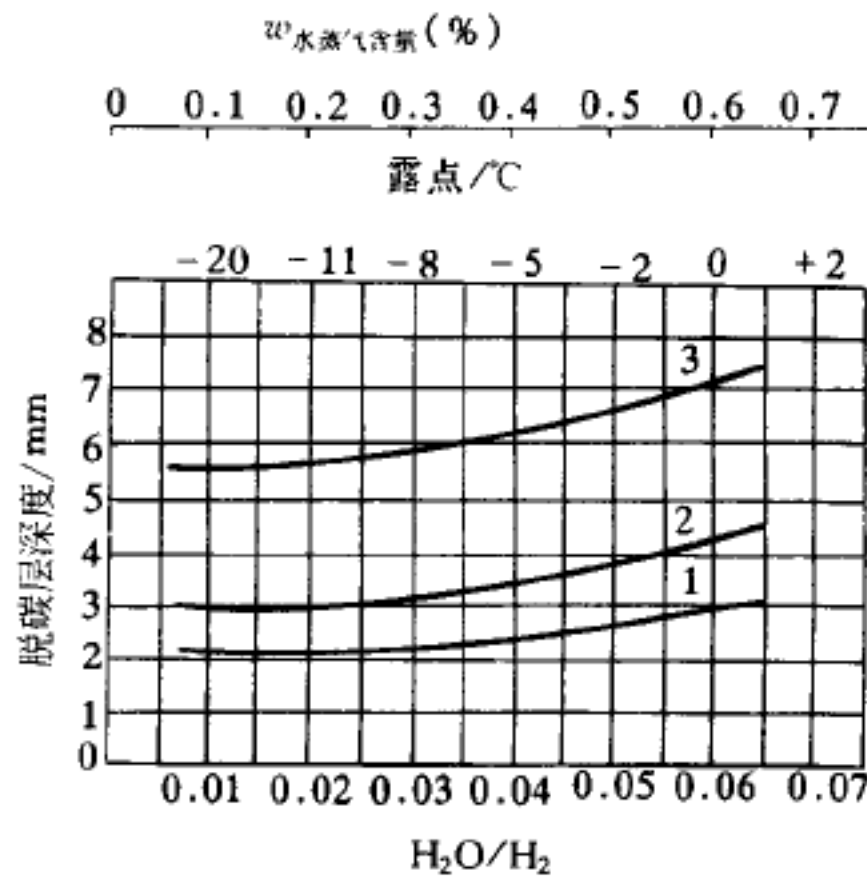
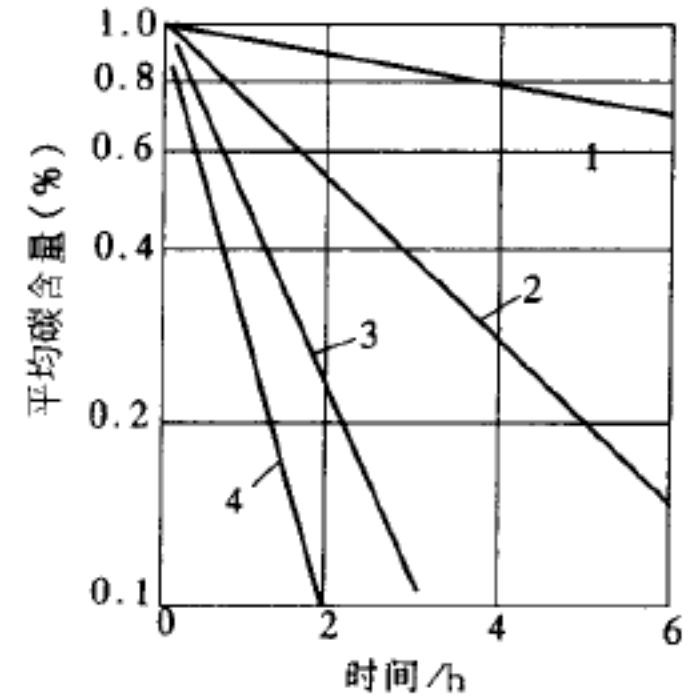
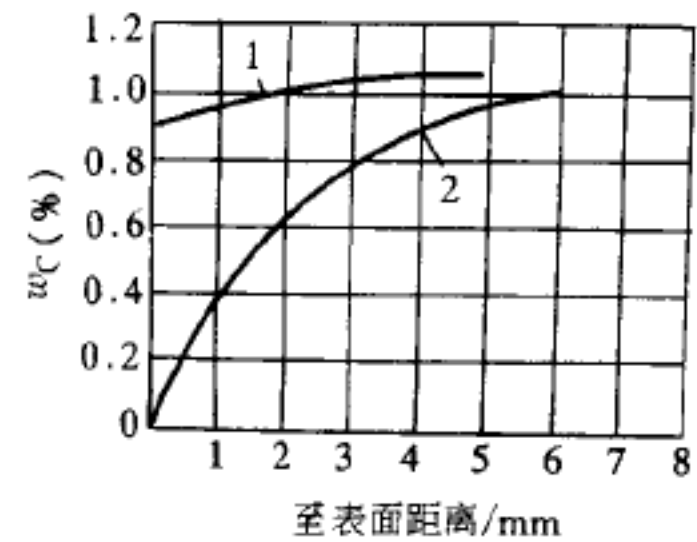
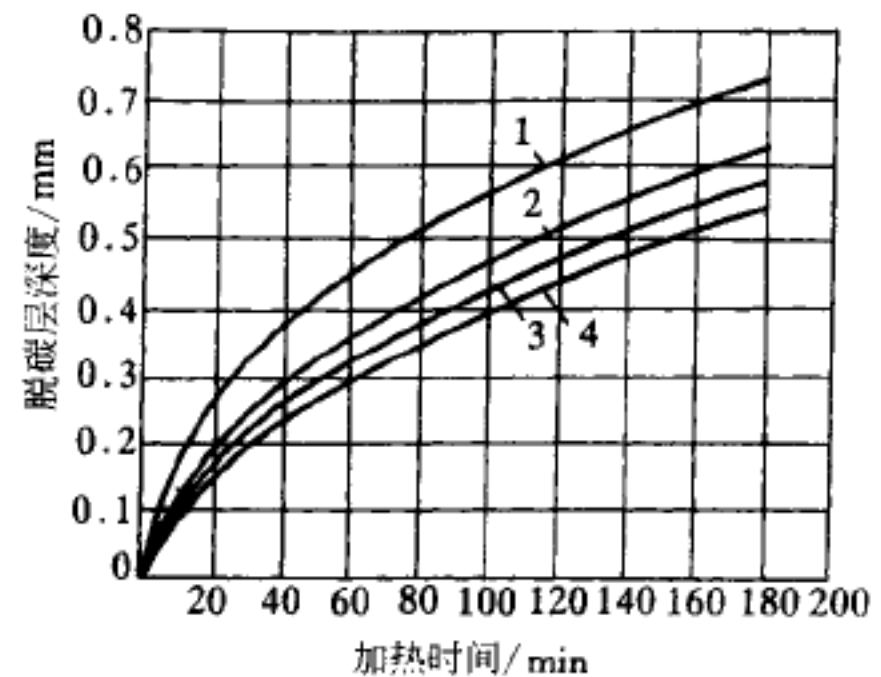
图 6-57 $\text{H}_2\text{-H}_2\text{O-N}_2$ 和铁、铬的平衡曲线 (含量均为质量分数)

图 6-59 钢在纯氢中的脱碳速度 (加热时间 16h, 碳、铬含量均为质量分数)

图 6-61 40 钢脱碳层深度和 $\text{H}_2\text{-H}_2\text{O-N}_2$ 气氛温度的关系 (850°C)
1—0.5h 2—1h 3—3h图 6-58 钢在 $\text{H}_2\text{-H}_2\text{O}$ 气体中的脱碳 (厚度 1mm 钢片, 1000°C 处理)1—干燥 H_2 2—133.32Pa
3—666.6Pa 4—2.67kPa图 6-60 含 $w_C 1.08\%$ 的钢在 $\text{H}_2\text{-H}_2\text{O}$ 气氛中于 1000°C 加热 20h 的脱碳

1—干燥氢 2—在 18°C 饱和水的氢 (16.4g/m³)

图 6-62 40 钢脱碳层厚度和加热时间的关系 [加热温度 850°C; 炉内气氛 (体积分数) 8% ~ 12% H_2 , 其余 N_2]1— $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2 = 0.065$ 2— $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2 = 0.045$
3— $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2 = 0.033$ 4— $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2 = 0.025$

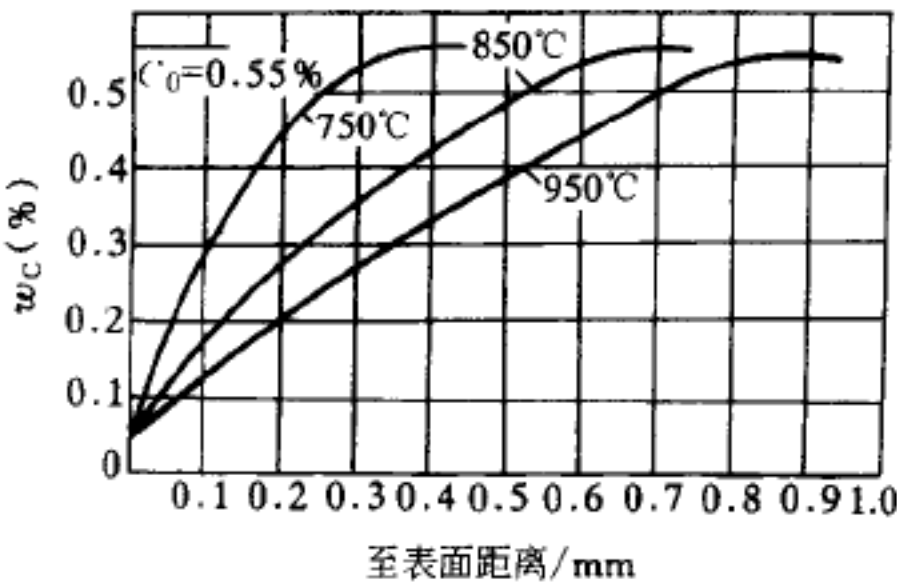


图 6-63 50 钢在 $H_2-H_2O-N_2$ 气氛中于不同温度下的脱碳 ($H_2O/H_2 = 0.037 \sim 0.04$; 加热时间 3h)

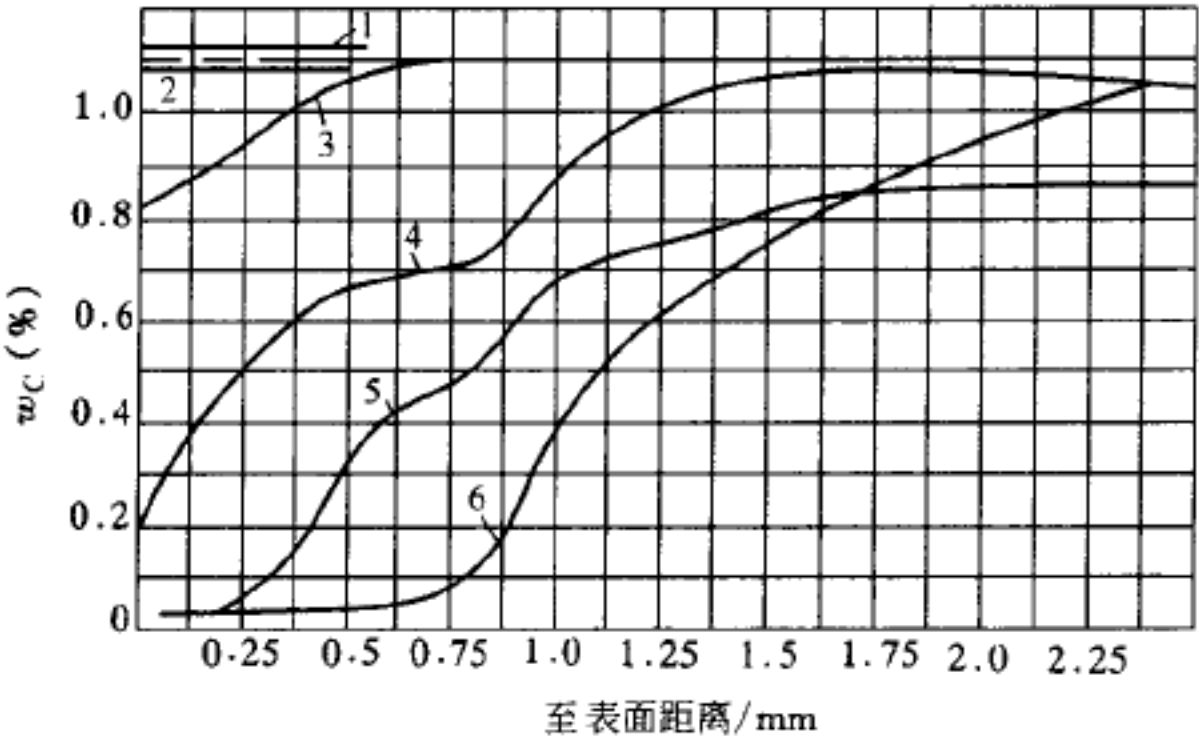


图 6-64 含 $w_C 1.10\%$ 的钢在 H_2-H_2O 气氛中于 $800^\circ C$ 加热 5.5h 的脱碳
1、2—绝对干燥的纯氢 3— $H_2 + 0.35g/m^3 H_2O$ (露点 $-28^\circ C$)
4— $H_2 + 1.78g/m^3 H_2O$ (露点 $-11^\circ C$) 5— $H_2 + 5.65g/m^3 H_2O$ (露点 $+2^\circ C$) 6—饱和水的氢

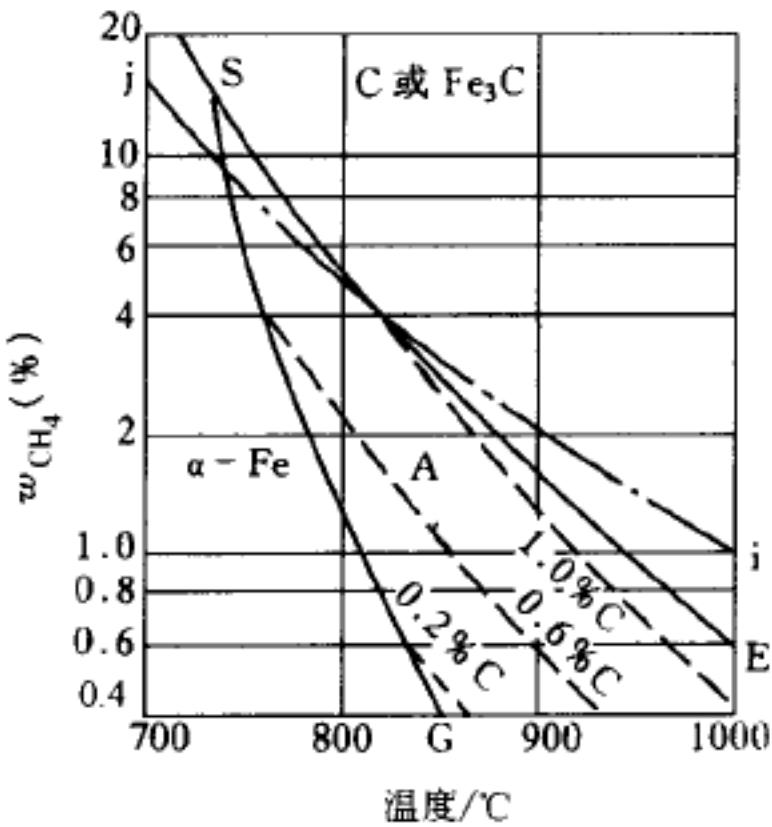


图 6-65 $Fe-CH_4-H_2$ 的平衡相图
($p_{CH_4} + p_{H_2} = 0.1MPa$)

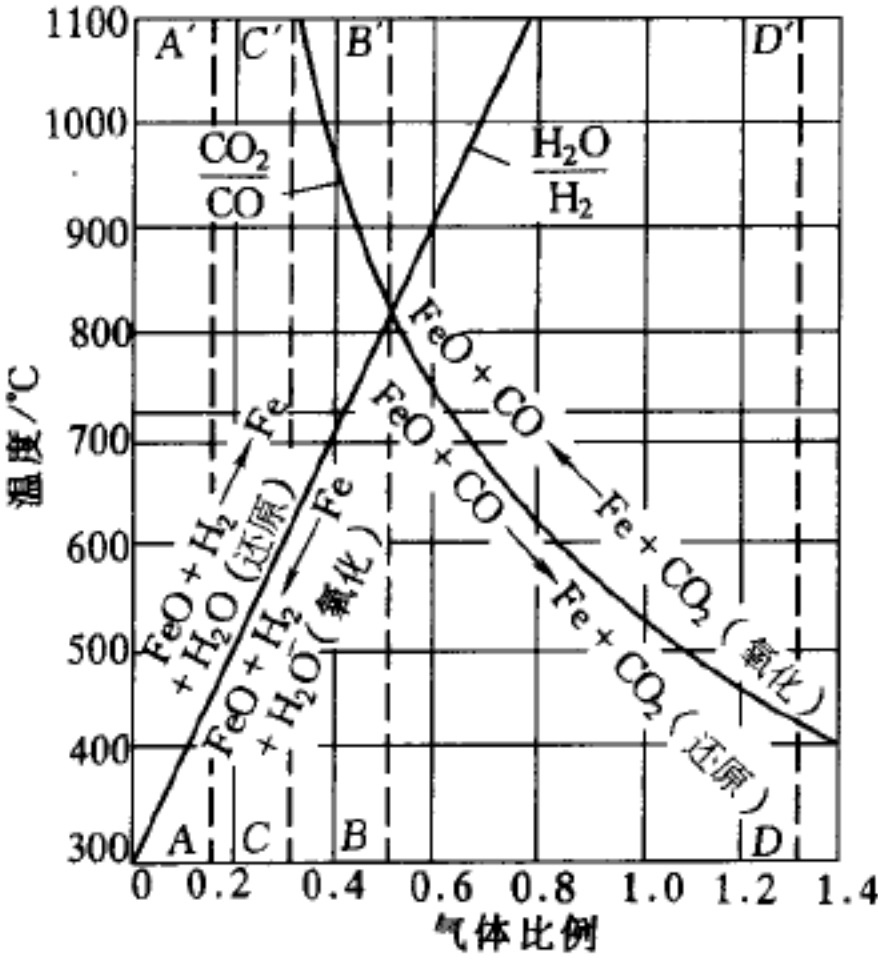


图 6-66 $Fe-FeO-H_2-H_2O$ 和 $Fe-FeO-CO-CO_2$ 的理论平衡关系

6.9 淬火冷却过程 (表 6-25、表 6-26 和图 6-67 ~ 图 6-73)

表 6-25 金属冷却各阶段特征 (图 6-67)

冷却阶段	特 征
A'	有时也称做液体初始接触期, 是在工件被蒸汽膜完全包围前的蒸汽膜形成阶段, 只延续 0.1s, 用一般方法测不出来, 此阶段对评定介质性质不重要
A	蒸汽膜 (膜沸腾) 阶段, 在工件表面包围一层蒸汽膜、工件和淬火液被膜隔离, 热流通过膜才能传递, 冷却较慢
B	沸腾 (核沸腾) 冷却阶段, 工件表面温度降低到某一瞬间、蒸汽膜局部破裂, 工件和淬火液开始直接接触产生大量气泡, 介质吸收热量大增, 此段冷速最大
C	对流冷却阶段, 工件表面温度降至淬火液沸点以下, 停止沸腾, 工件和液体完全接触、形成热的对流传导, 此段长短取决于工件和介质的温差以及介质的热物理性质

表 6-26 $\phi 12.5\text{mm } w_c 0.95\%$ 钢棒在各种
淬火介质的心部冷速^①

介 质		心部冷速 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$
化学成分	浓度 (%) ^②	
水		100 ~ 120
NaOH	2.5	196
NaOH	5.0	202
NaOH	11.5	202
NaOH	16.5	207
NaCl	5.0	171
NaCl	10.0	196
CaCl ₂	5.0	171
CaCl ₂	10.0	193
CaCl ₂	20.0	171
Na ₂ CO ₃	10.0	171
HCl	5.0	151
HCl	12.5	151
HCl	20.0	96
HCl	36.0	< 51
H ₂ SO ₄	5 ~ 20	143 ~ 151
H ₂ SO ₄	30.0	93
H ₂ SO ₄	95.0	77

① 淬火液温度 19.4℃；钢棒从 877℃ 冷到 727℃ 的冷速。
② 浓度为质量百分数。

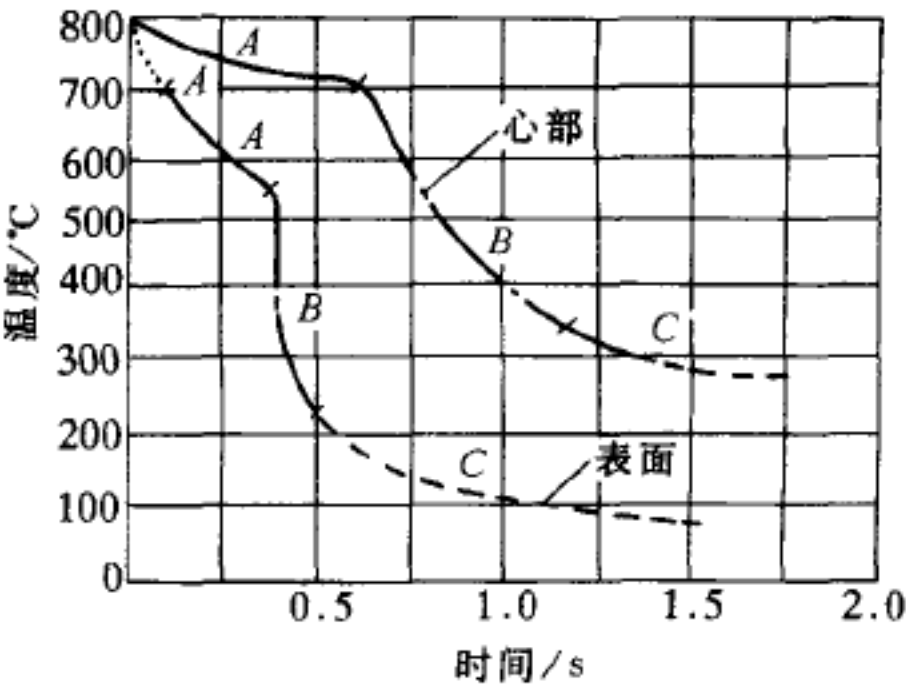


图 6-67 热固态金属在冷却液中冷却时，显示不同传热阶段的表面和心部的冷却典型曲线

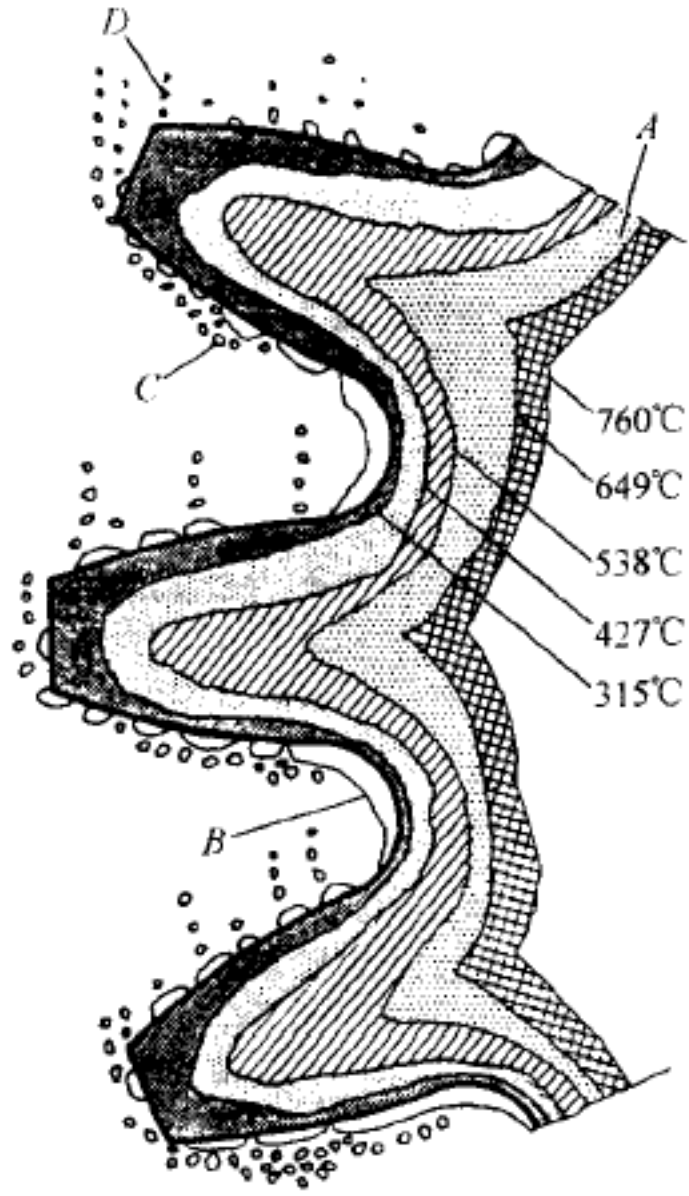


图 6-68 温度梯度和其他主要因素对齿轮的淬火过程发生影响，齿轮由表及里地在静止的易蒸发的液体中淬冷
A—来自齿轮心部的热流、温度和流率随时间变化 B—由于充足的热源和搅动贫乏仍存在蒸汽膜期 C—集聚的蒸汽冷凝缓慢 D—蒸汽泡散失和冷凝

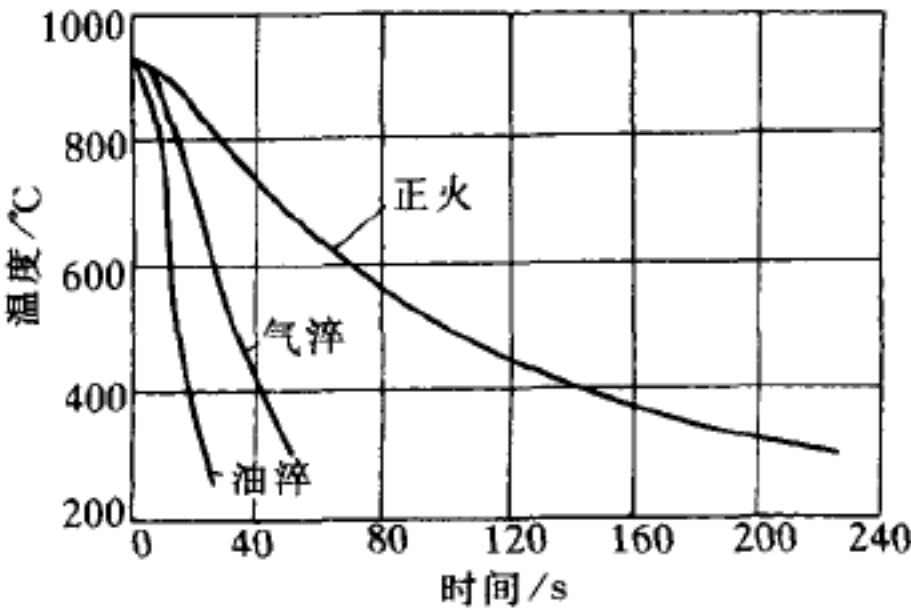


图 6-69 4130 钢（相当 30CrMo）管（ $\phi 31.7\text{mm} \times 1.6\text{mm}$ ）在油、保护气流和静止空气（正火）中的冷却曲线

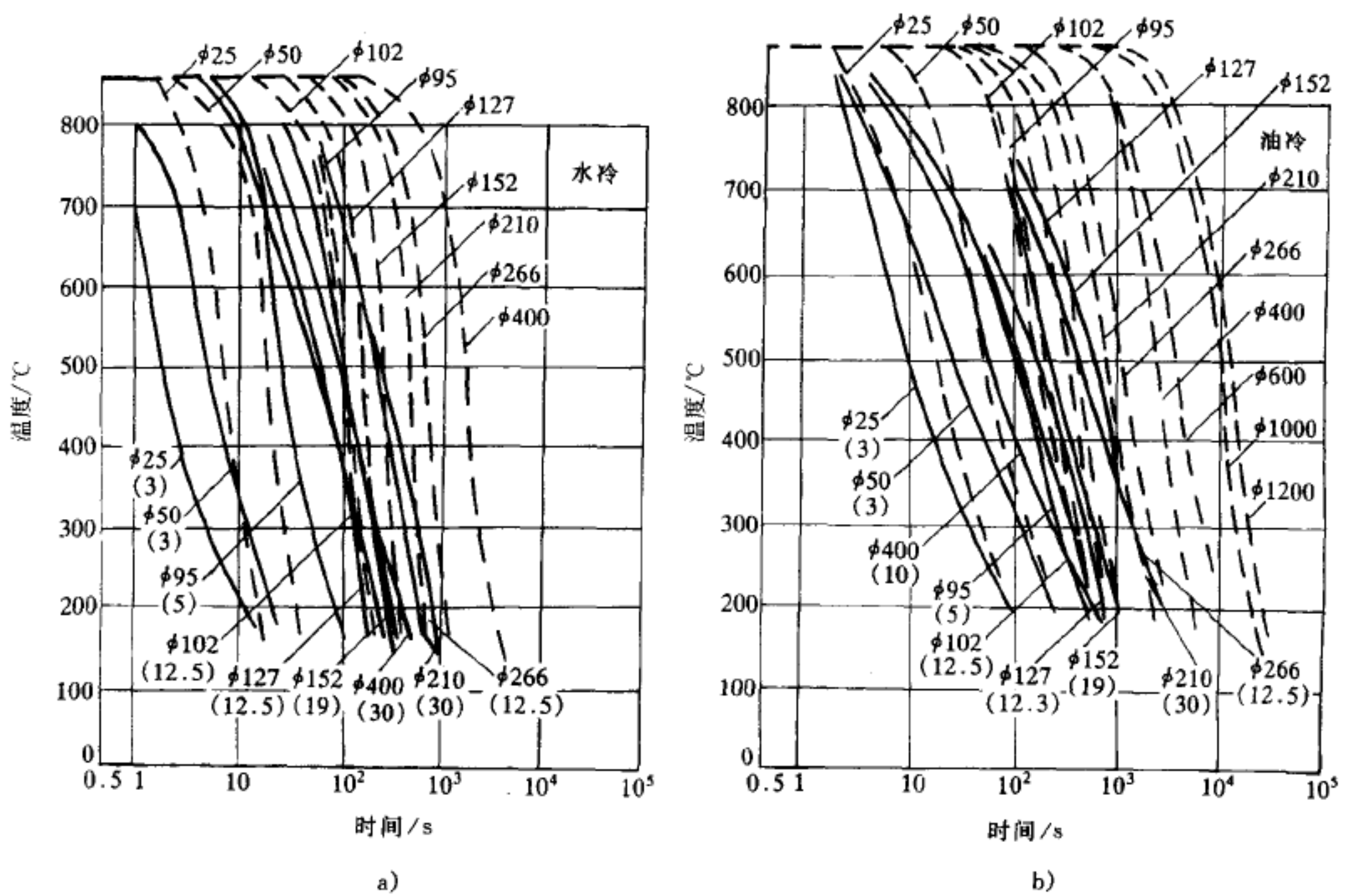


图 6-70 钢制圆棒在淬火时表面和中心的冷却曲线
(括号中的数字是测温点至表面的距离)

a) 水淬 b) 油淬
实线—表面 虚线—中心

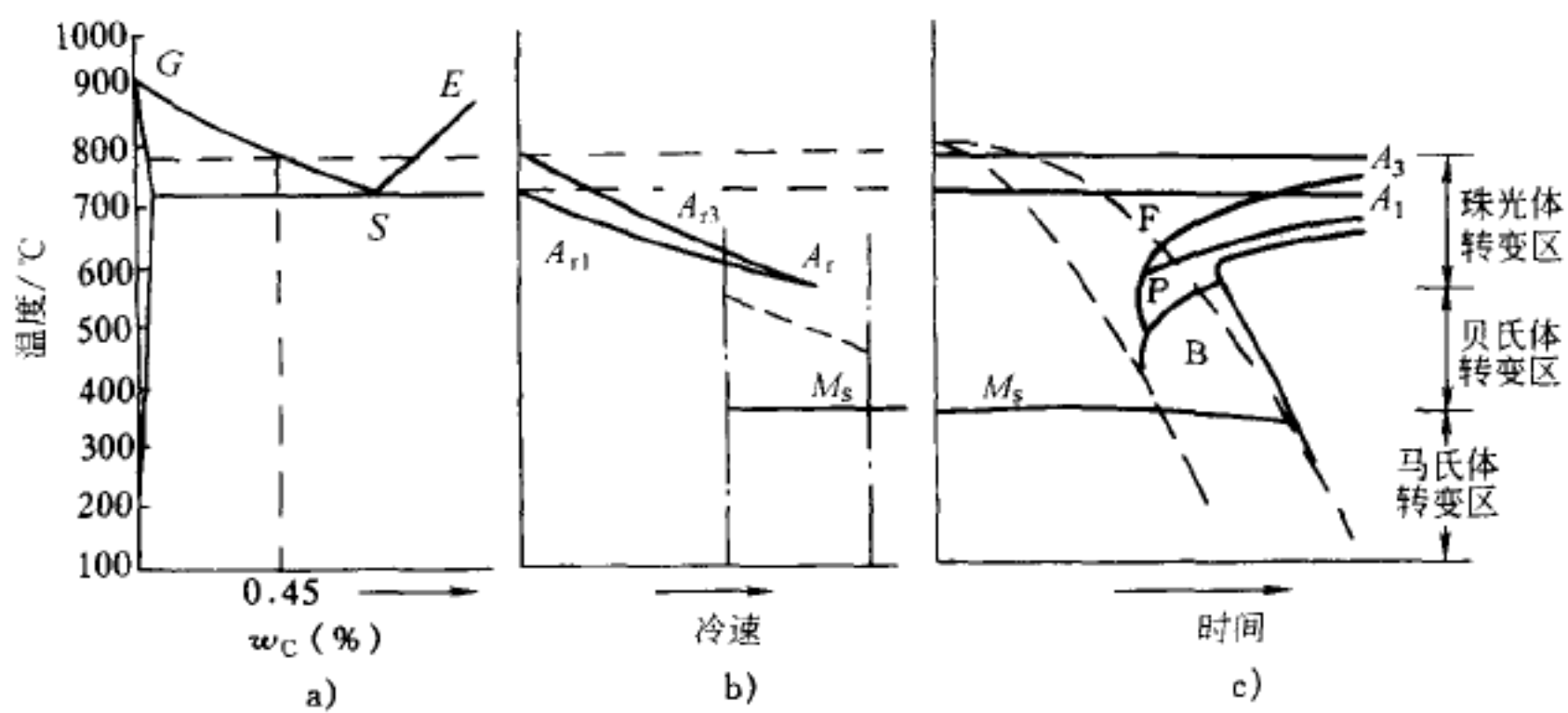


图 6-71 冷却速度对奥氏体转变温度的影响

a) Fe-Fe₃C 相图 b) 1040 钢随冷速增加的相变温度变化
c) 1040 钢的连续冷却转变图

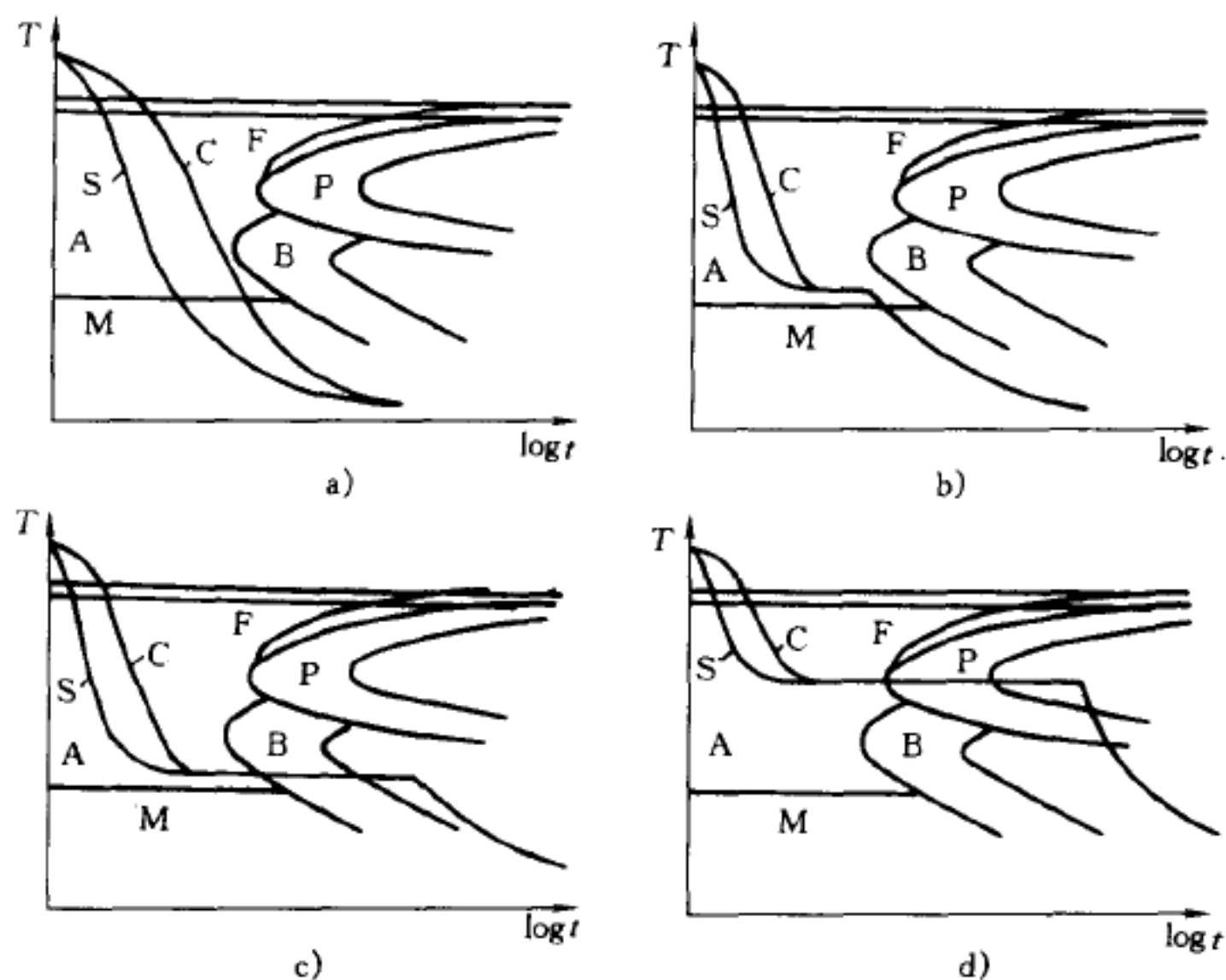


图 6-72 工件各种淬冷方法的表面和心部冷却曲线和奥氏体等温转变图的关系
a) 直接淬火 b) 分级淬火 c) 等温淬火 d) 等温退火或珠光体化

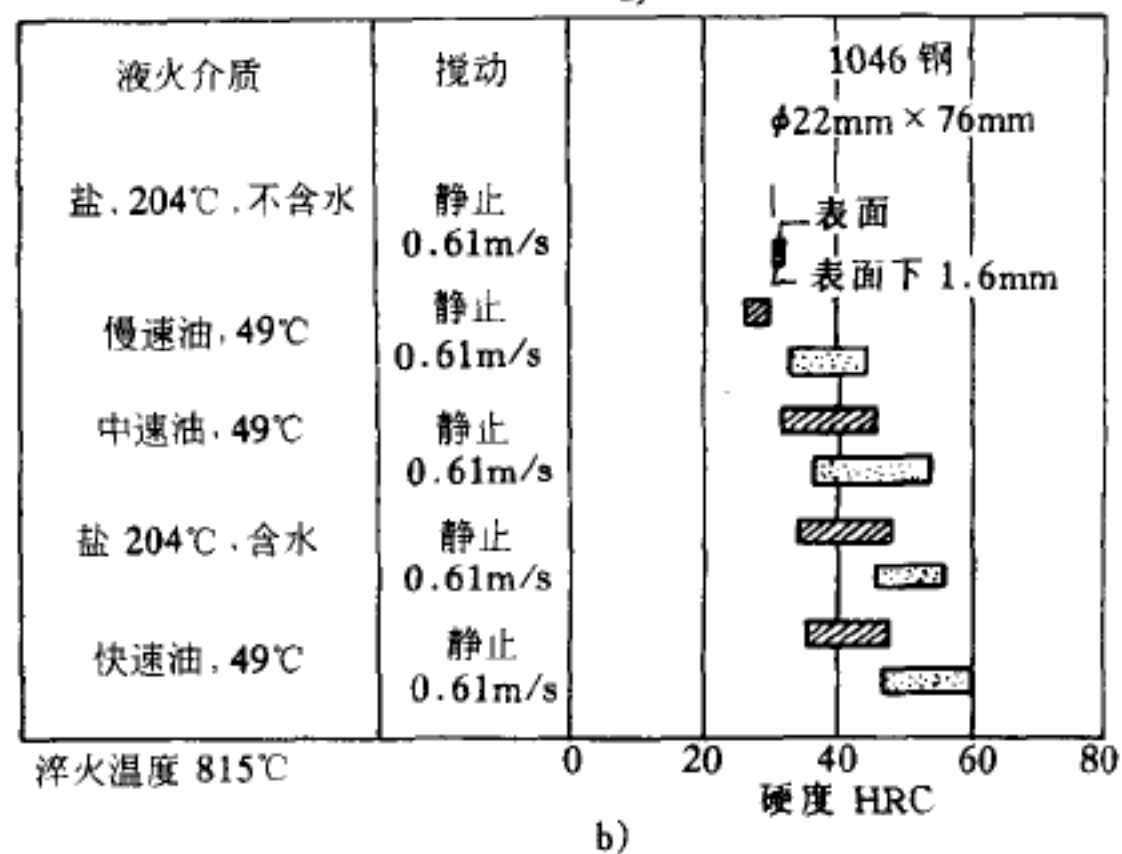
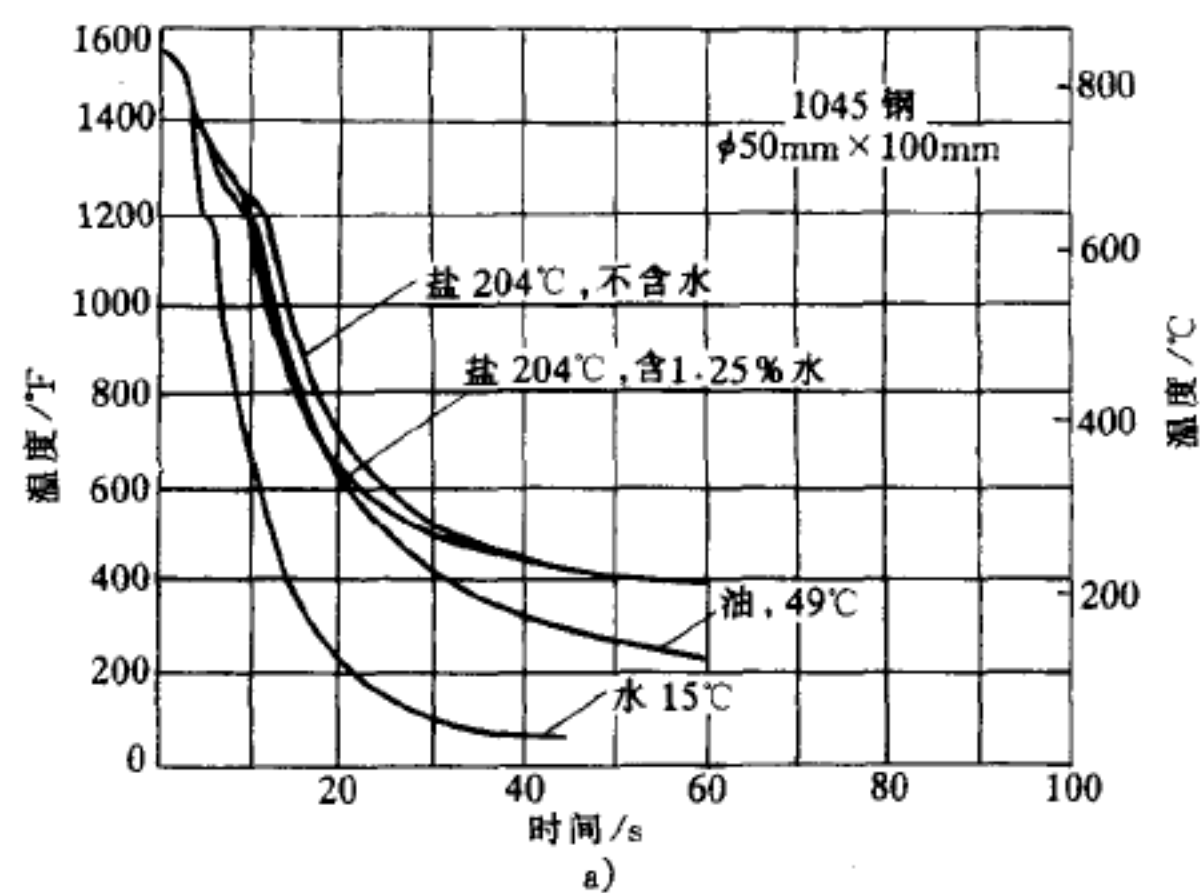


图 6-73 1045 钢 (类似 45 钢) 棒在盐、水和油中冷却曲线的比较
a) 热电偶在试棒心部 b) 淬火剂和搅动对 1046 钢硬度的影响

6.10 淬火冷却介质

1. 水 (图 6-74 ~ 图 6-79)

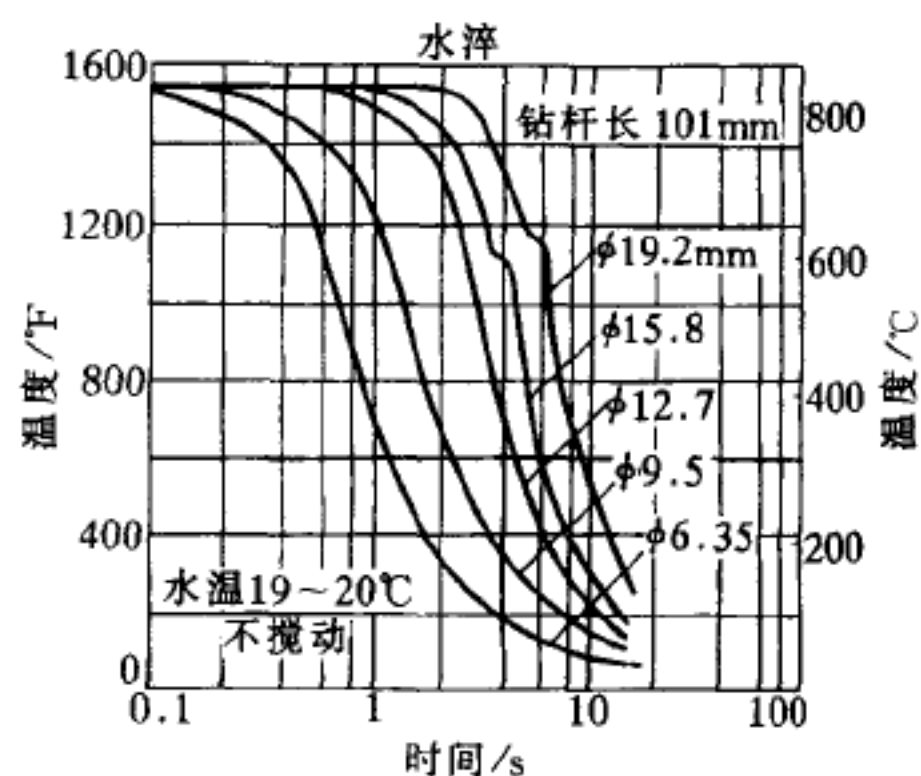


图 6-74 101mm 长各不同直径钻杆在静止水中淬火时质量和尺寸对冷却曲线的影响

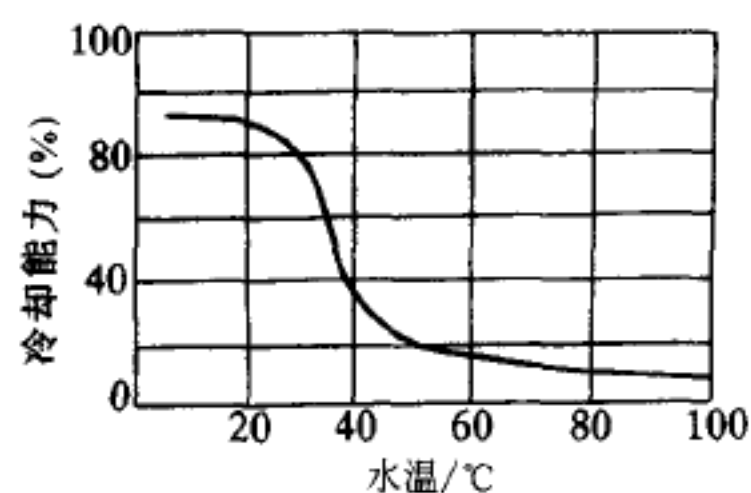


图 6-75 在现有搅动条件下水的表面冷却能力随水温的变化

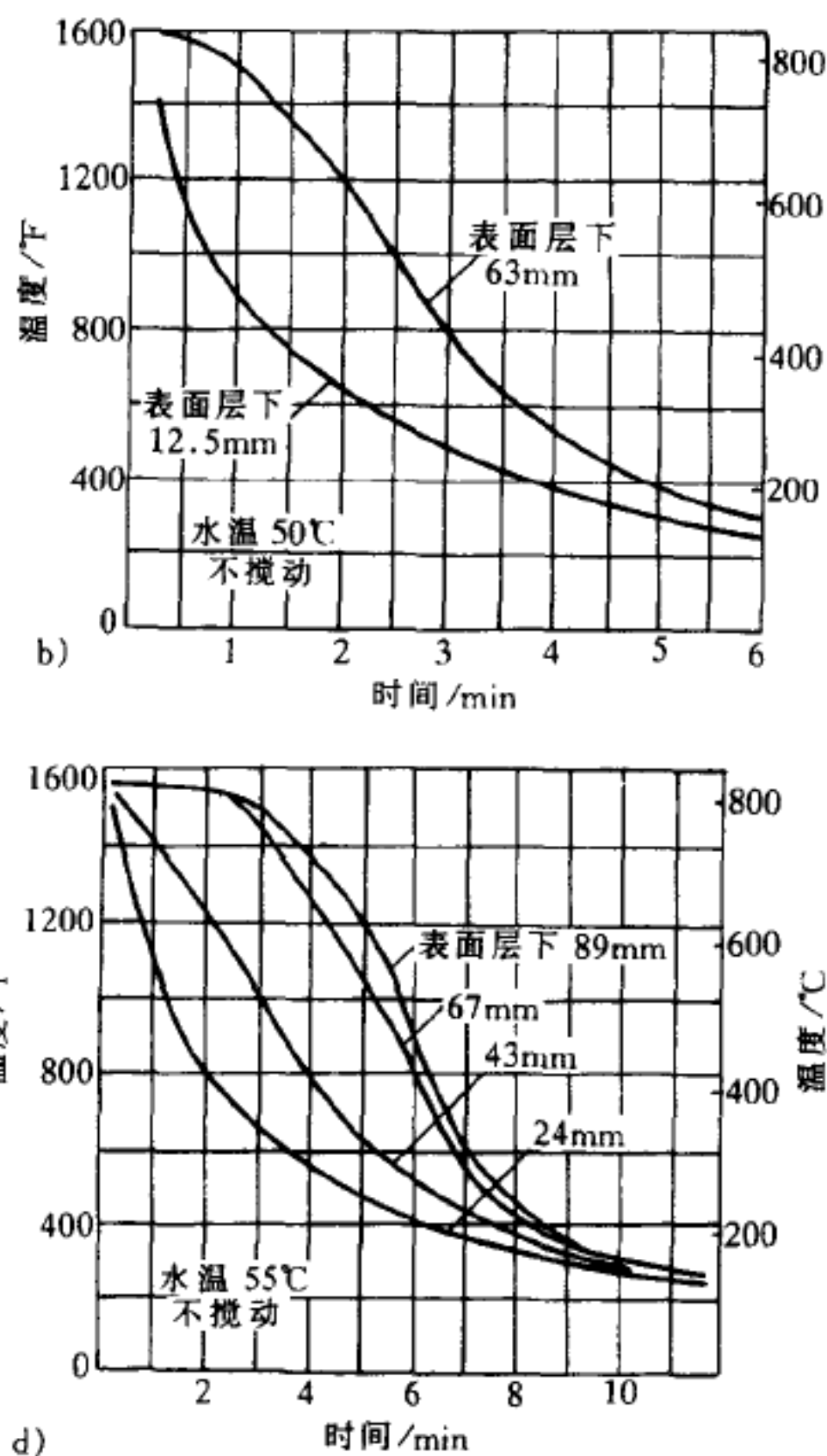
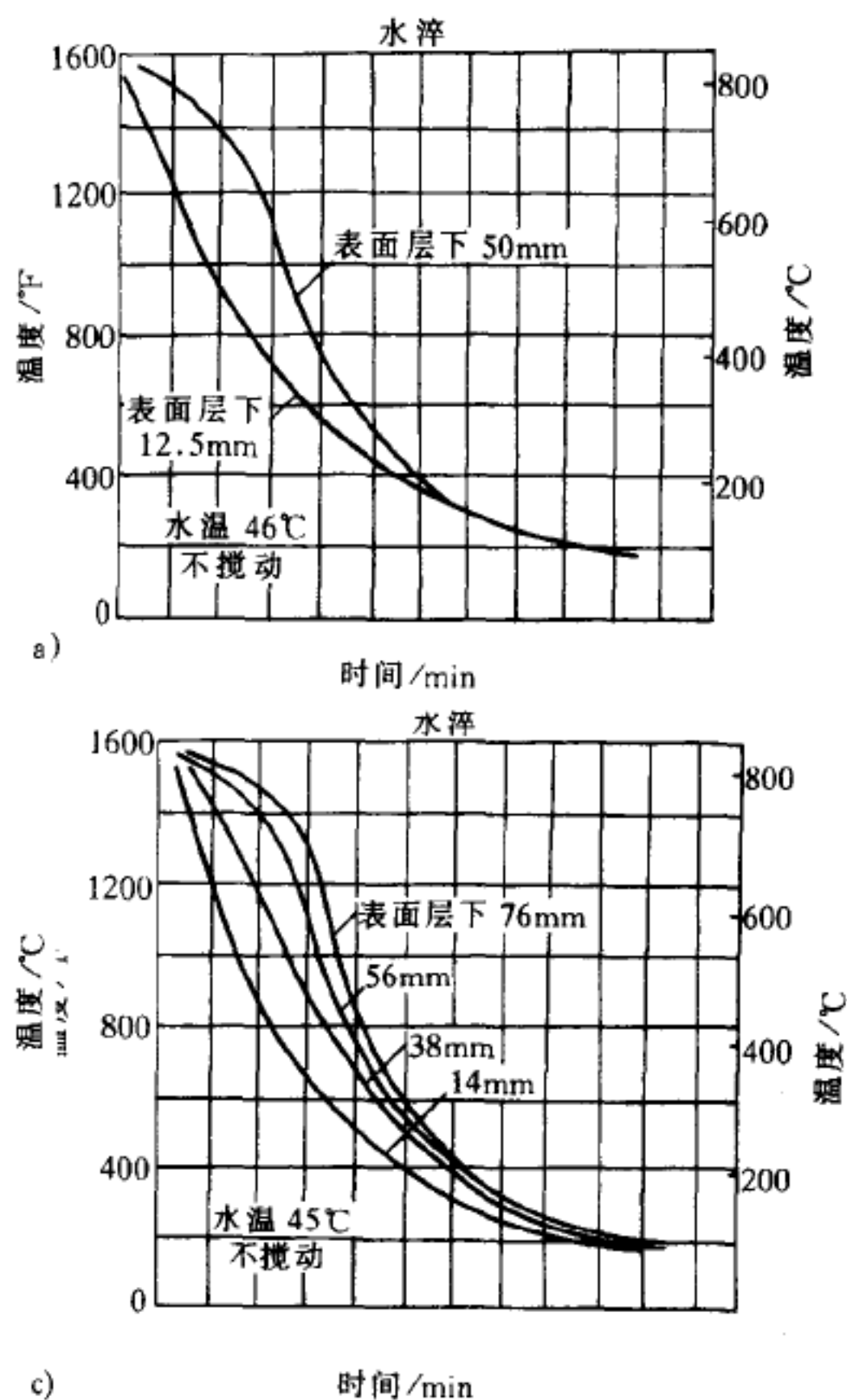


图 6-76 工件质量和尺寸对水淬冷却曲线的影响

a) 1045 钢 $\phi 100\text{mm}$ 约重 19.5kg b) 1035 钢 $\phi 125\text{mm}$ 约重 38.5kg
c) 1020 钢 $\phi 152\text{mm}$ 约重 64kg d) 1040 钢 $\phi 178\text{mm}$ 约重 104kg

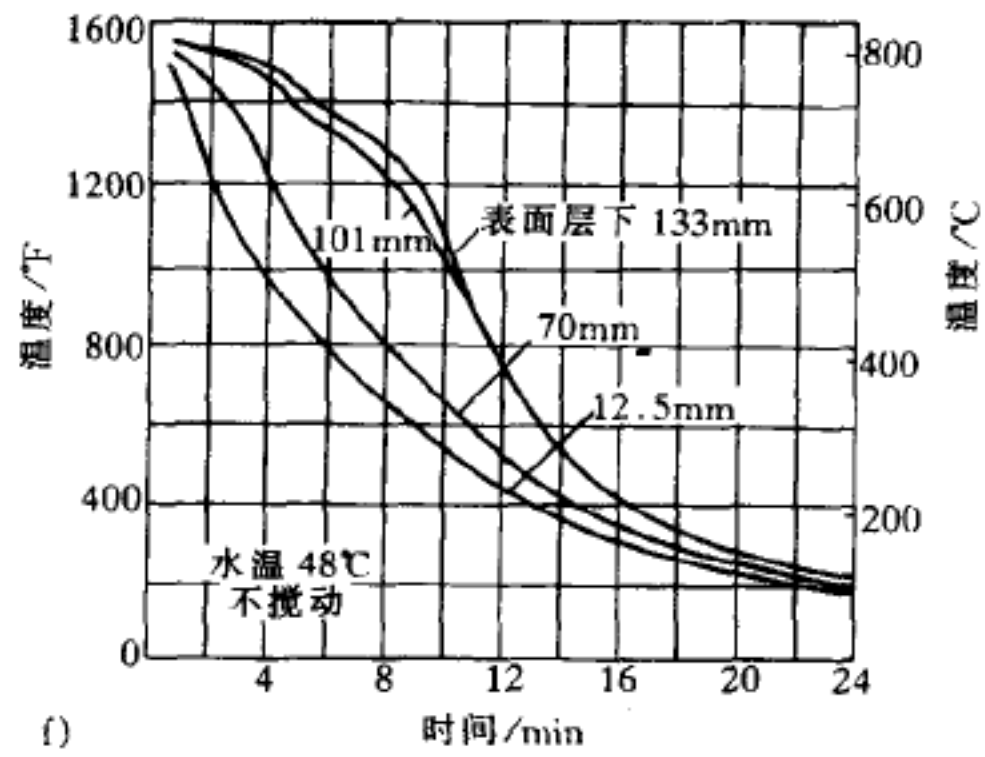
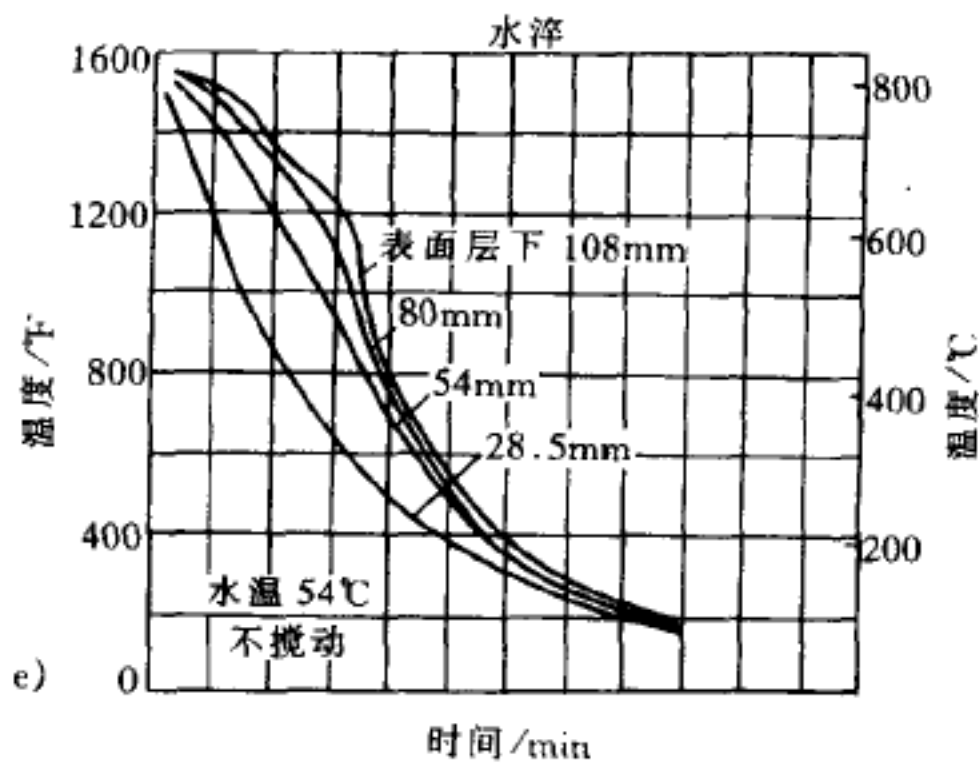
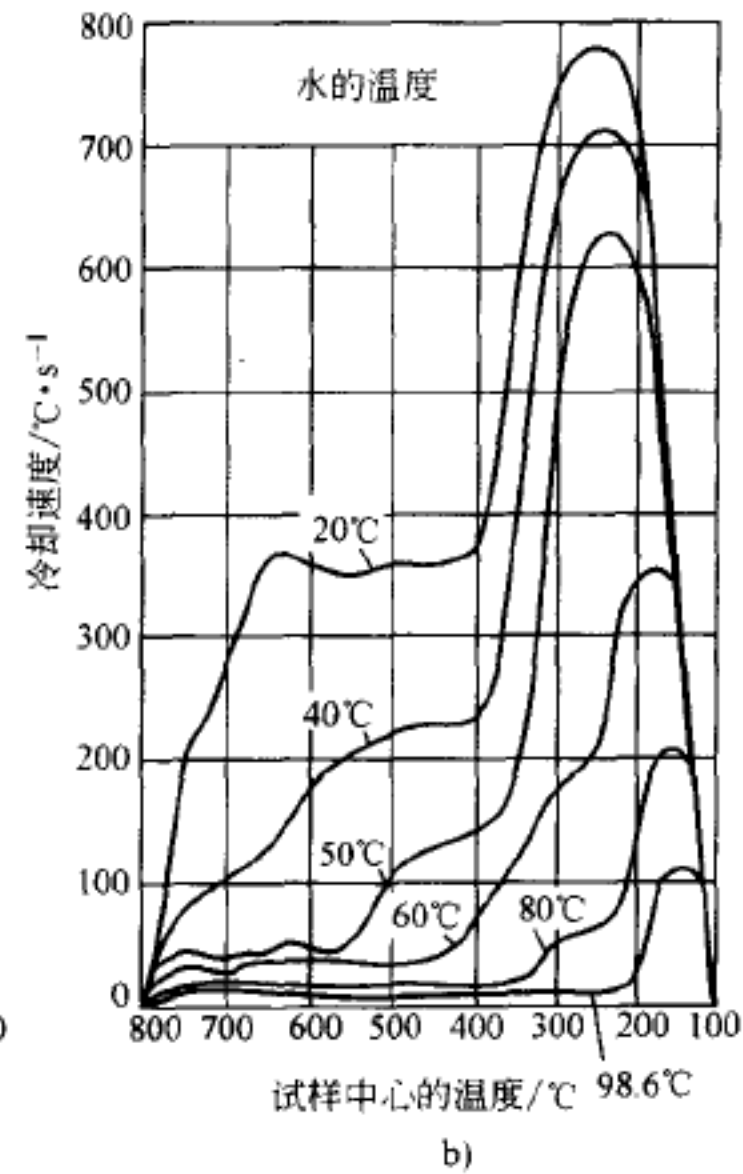
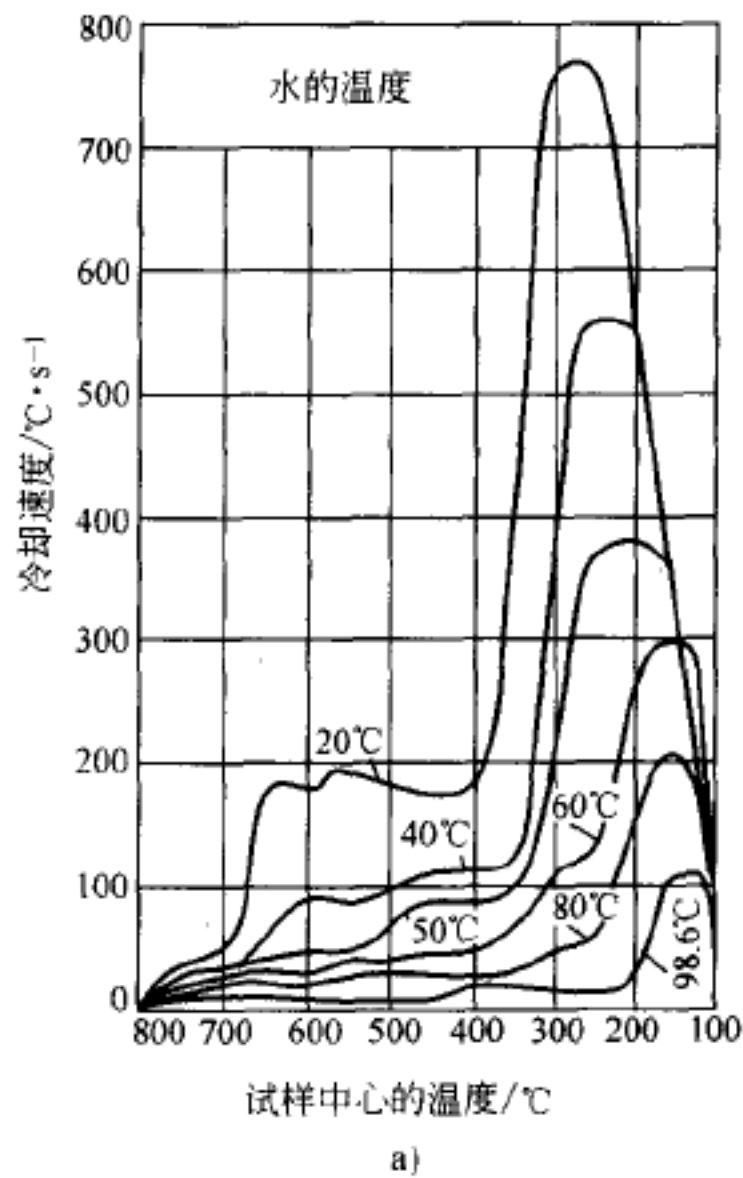


图 6-76 (续)

e) 1040 钢 $\phi 210\text{mm}$ 约重 186kg f) 1040 钢 $\phi 266\text{mm}$ 约重 333kg图 6-77 水的冷却速度曲线 ($\phi 20\text{mm}$ 银球试样)

a) 静止的 b) 循环的

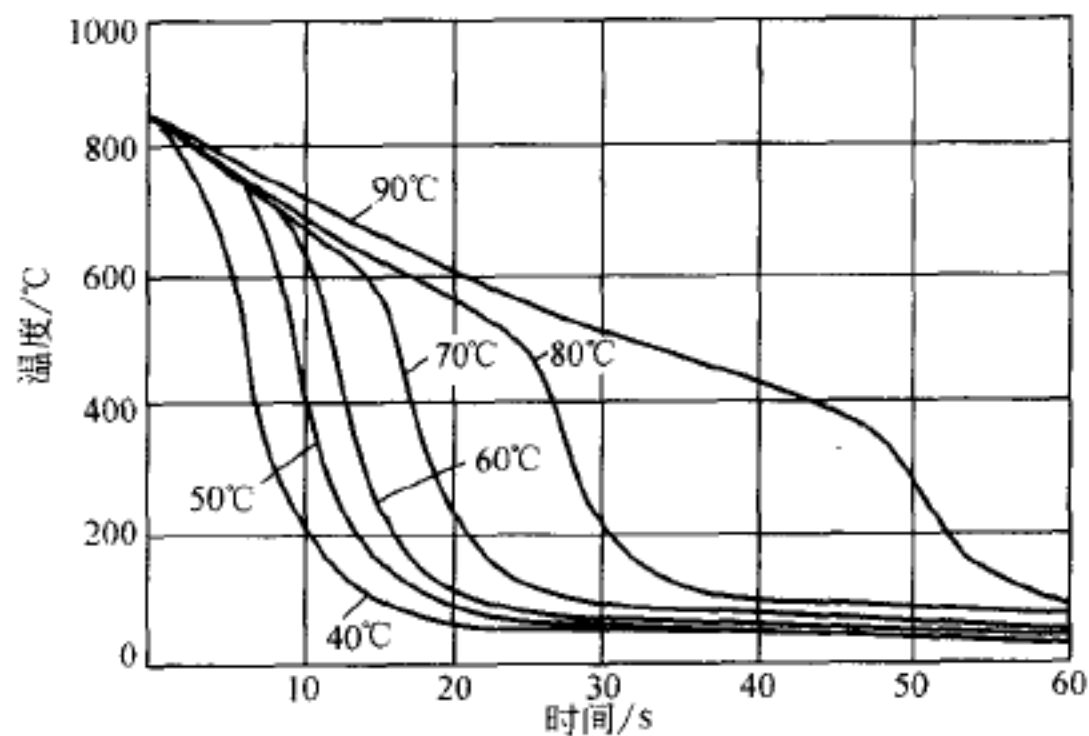
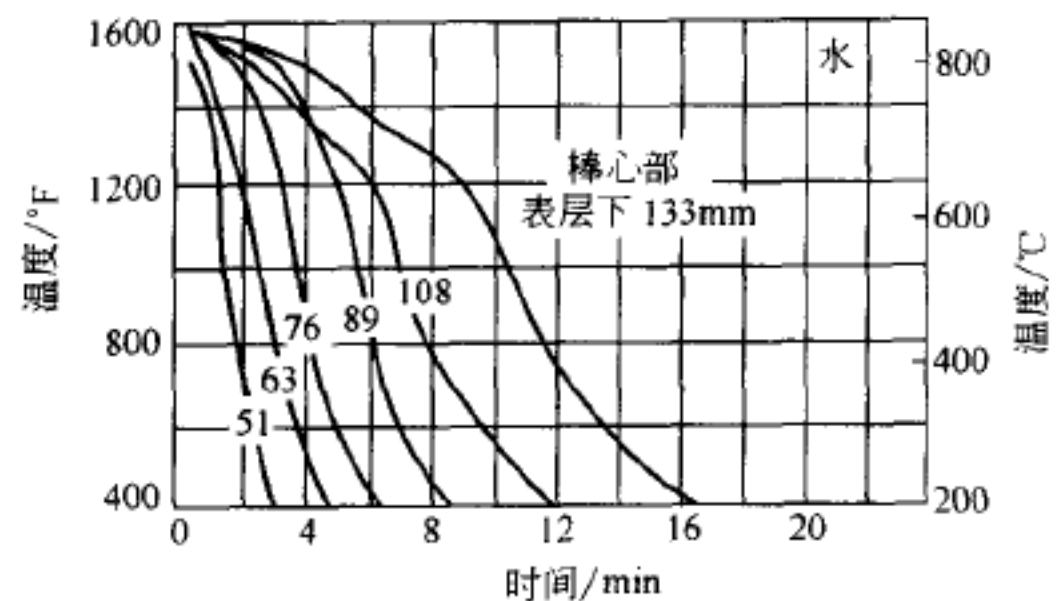
图 6-78 $\phi 12.5\text{mm} \times 60\text{mm}$ Inconel 600 钢试棒心部在不同温度水中的冷却曲线 (水流速 0.25m/s)

图 6-79 钢件表面下不同深度在水中的冷却曲线

2. 盐、碱水溶液（表 6-27 和图 6-80 ~ 图 6-88）

表 6-27 水及盐、碱水溶液的性能

介质名称	净 水	苛性钠水溶液	氯化钠水溶液	碳酸钠水溶液
常用浓度 (质量分数)(%)		5 ~ 15	5 ~ 15	3 ~ 20
使用温度	≤ 40℃	≤ 60℃	≤ 60℃	≤ 60℃
冷却特点	1. 蒸汽膜阶段长，易产生气泡，淬火工件易出现软点 2. 在 300 ~ 200℃ 区间的冷却速度比 650 ~ 550℃ 区间速度大	由于盐、碱的加入，大大缩短蒸汽膜阶段，冷却能力显著提高，随着盐、碱含量的增多，冷却速度的最大值不断增大，但盐、碱的含量接近水的饱和溶解度时，由于溶液粘度增加，冷却速度反而降低，在同一浓度下苛性钠水溶液冷却能力最大，氯化钠水溶液次之，碳酸钠水溶液再次之		
适用范围	小截面碳素钢（浸入淬火）	碳素钢（形状简单的、要求硬度较高的工具和零件的淬火）	碳素钢（有效厚度 30 ~ 100mm，采用盐水或盐水—油淬火）	低浓度碳酸钠水溶液用途与氯化钠水溶液同，但其冷却能力略低

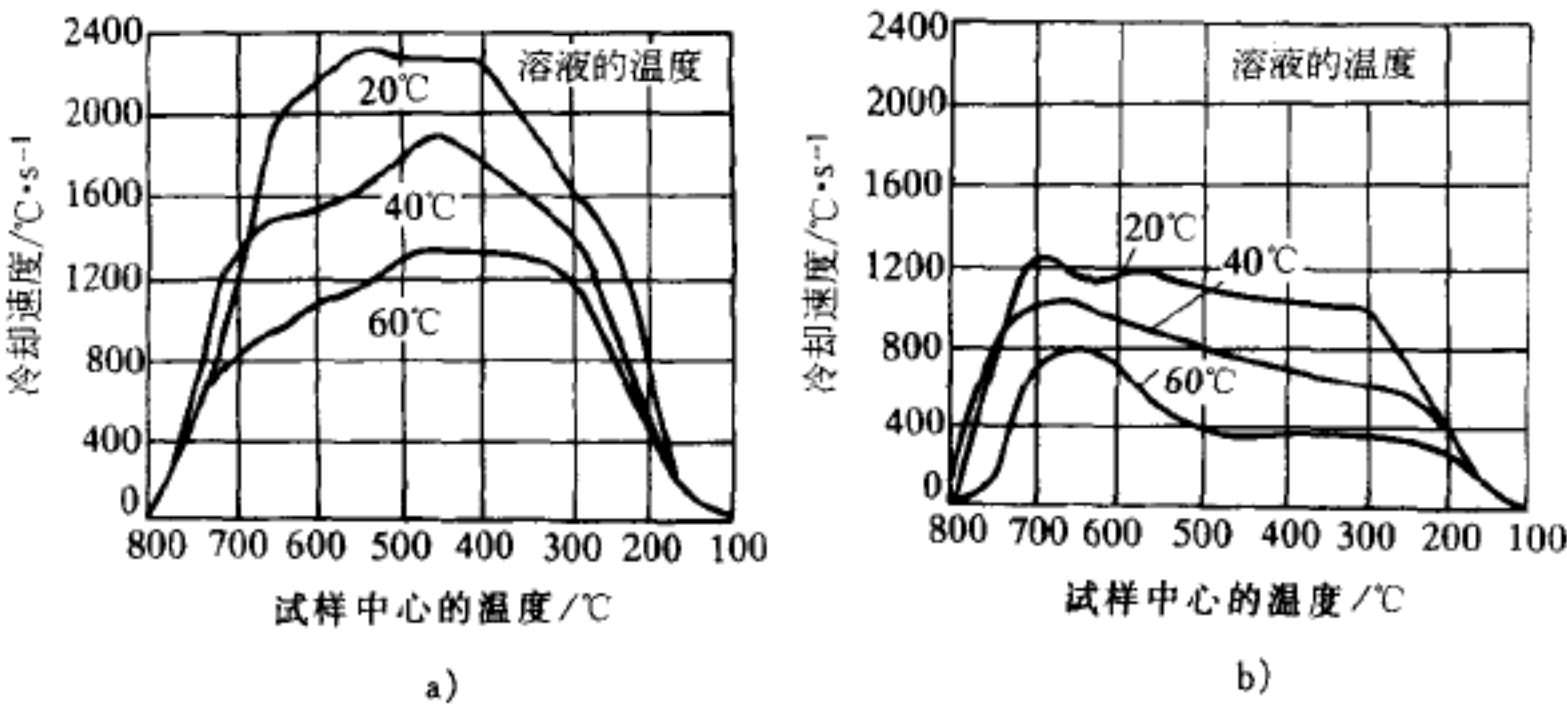


图 6-80 图 a) 10%（质量分数）和图 b) 20%（质量分数）食盐水溶液在不同温度下的冷却速度曲线（ $\phi 20\text{mm}$ 银球试样，试样移动速度 25cm/s）

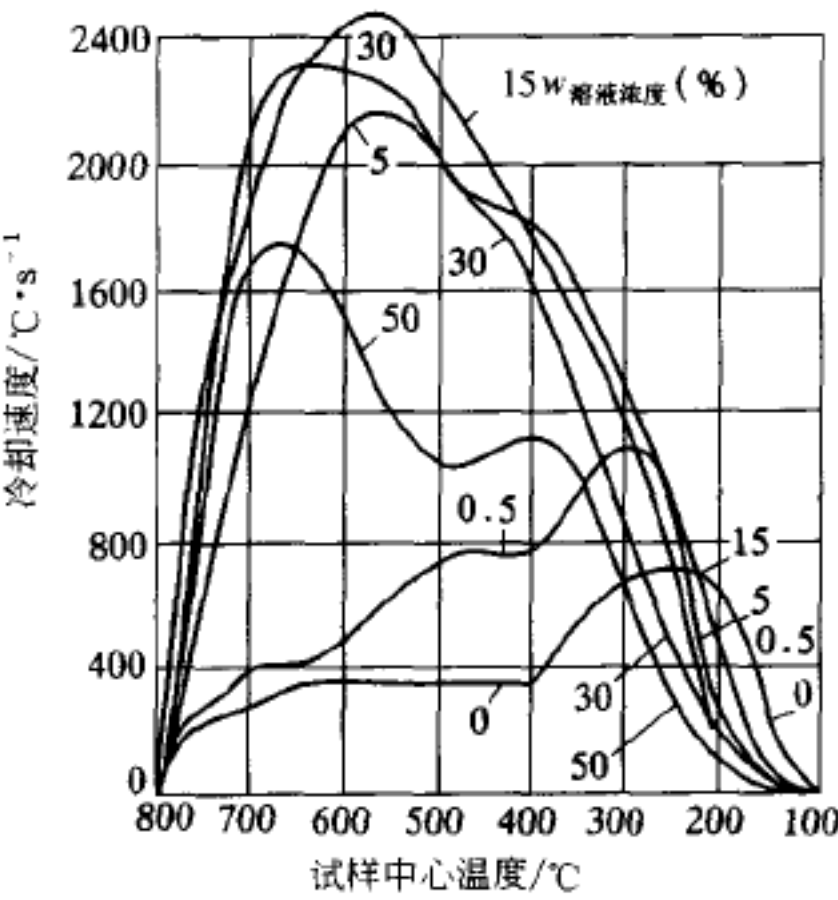


图 6-81 20℃ 苛性钠水溶液的冷却能力与其浓度的关系（ $\phi 20\text{mm}$ 银球试样，试样移动速度 25cm/s）

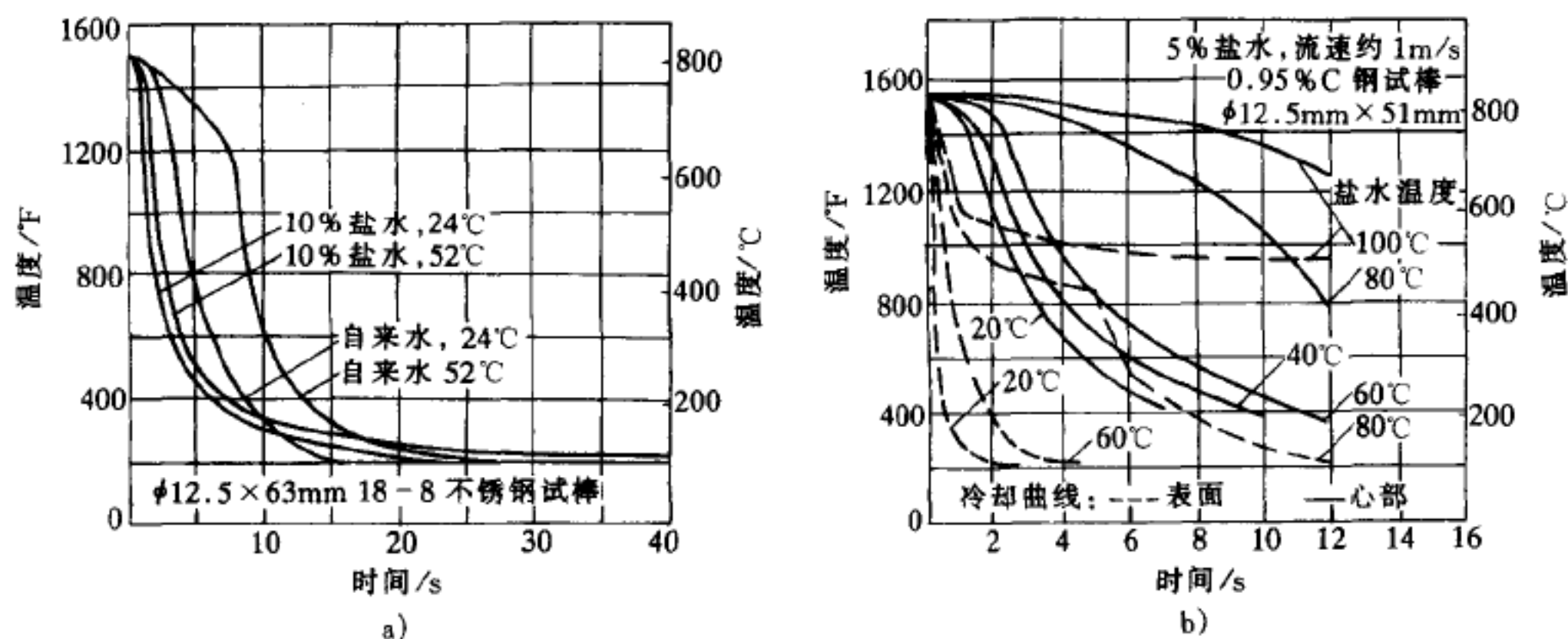


图 6-82 盐水和自来水冷却曲线

a) 18-8 不锈钢试棒在 10% (质量分数) NaCl 溶液和自来水中不搅动试棒心部冷却曲线与液温的关系 b) 高碳钢试棒在 5% (质量分数) 盐水于不同盐水温度下的表面和心部冷却曲线

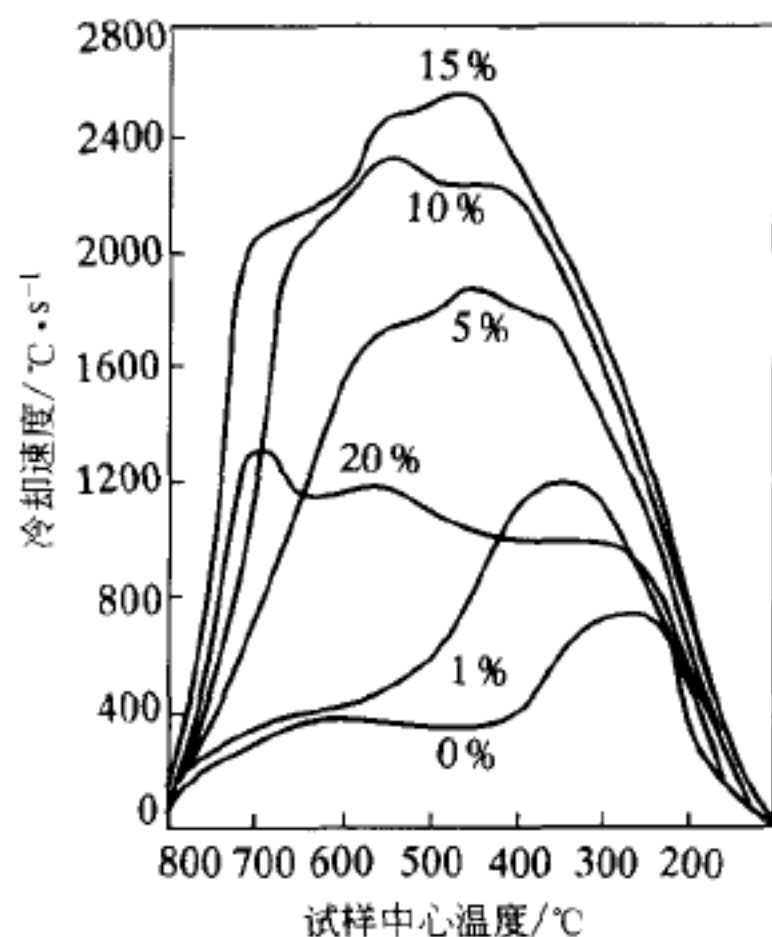


图 6-83 NaCl 溶液浓度 (质量分数) 对冷速的影响

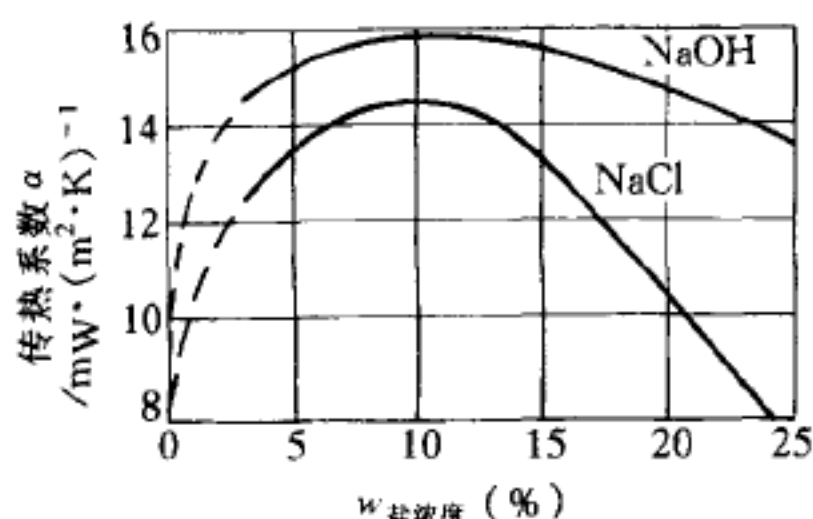


图 6-84 NaCl 和 NaOH 溶液 (质量分数) 传热系数的变化

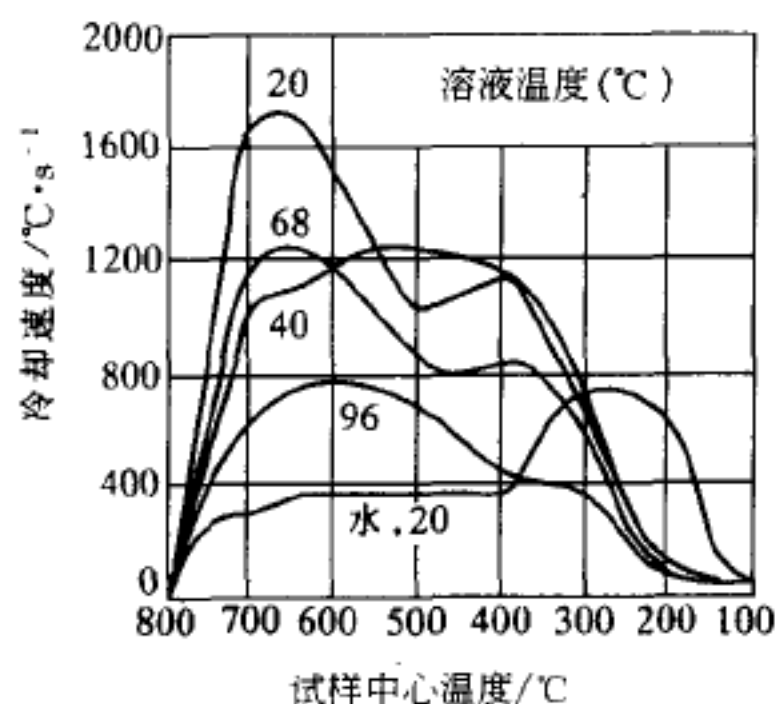


图 6-85 50% 苛性钠水溶液 (质量分数) 的冷却能力与其温度的关系
($\phi 20\text{mm}$ 银球试样 试样移动速度 25cm/s)

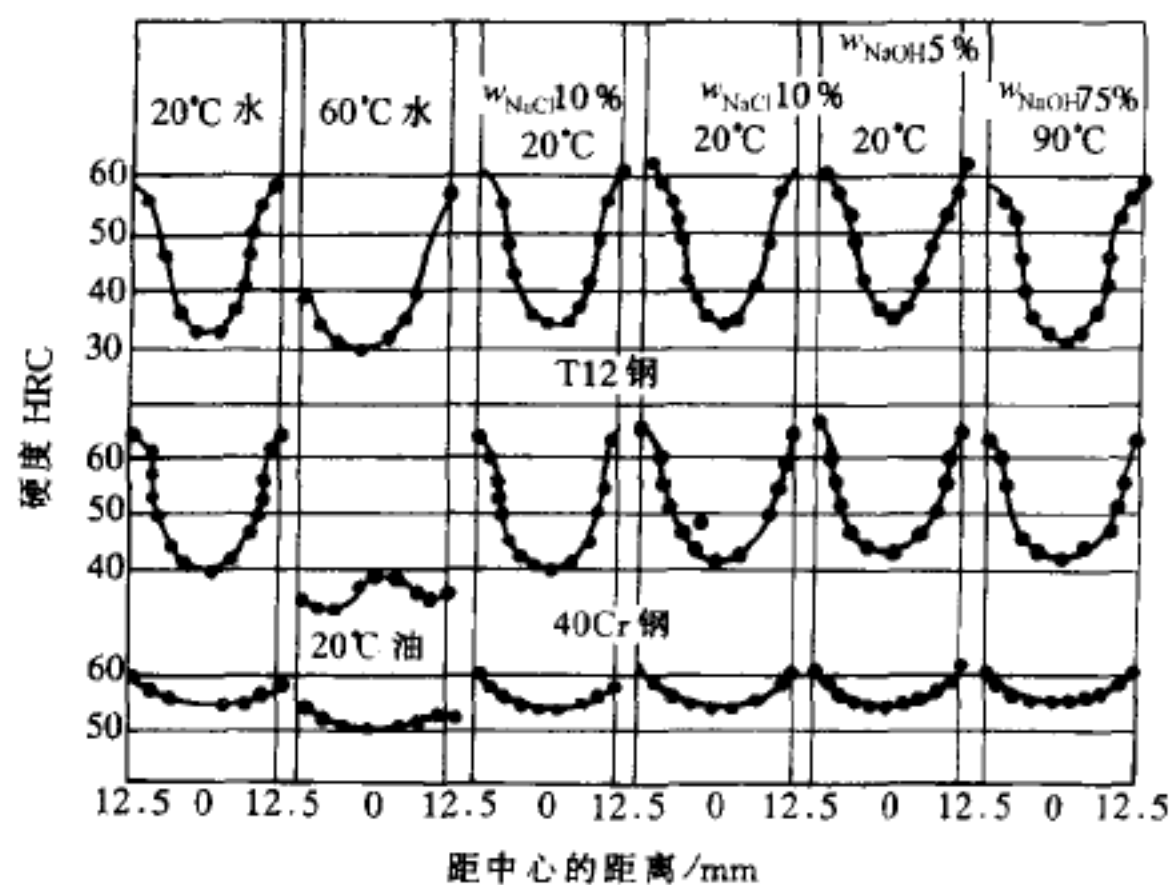


图 6-86 直径 25mm 的圆柱形试样在水、盐和碱的水溶液中淬冷的淬透性

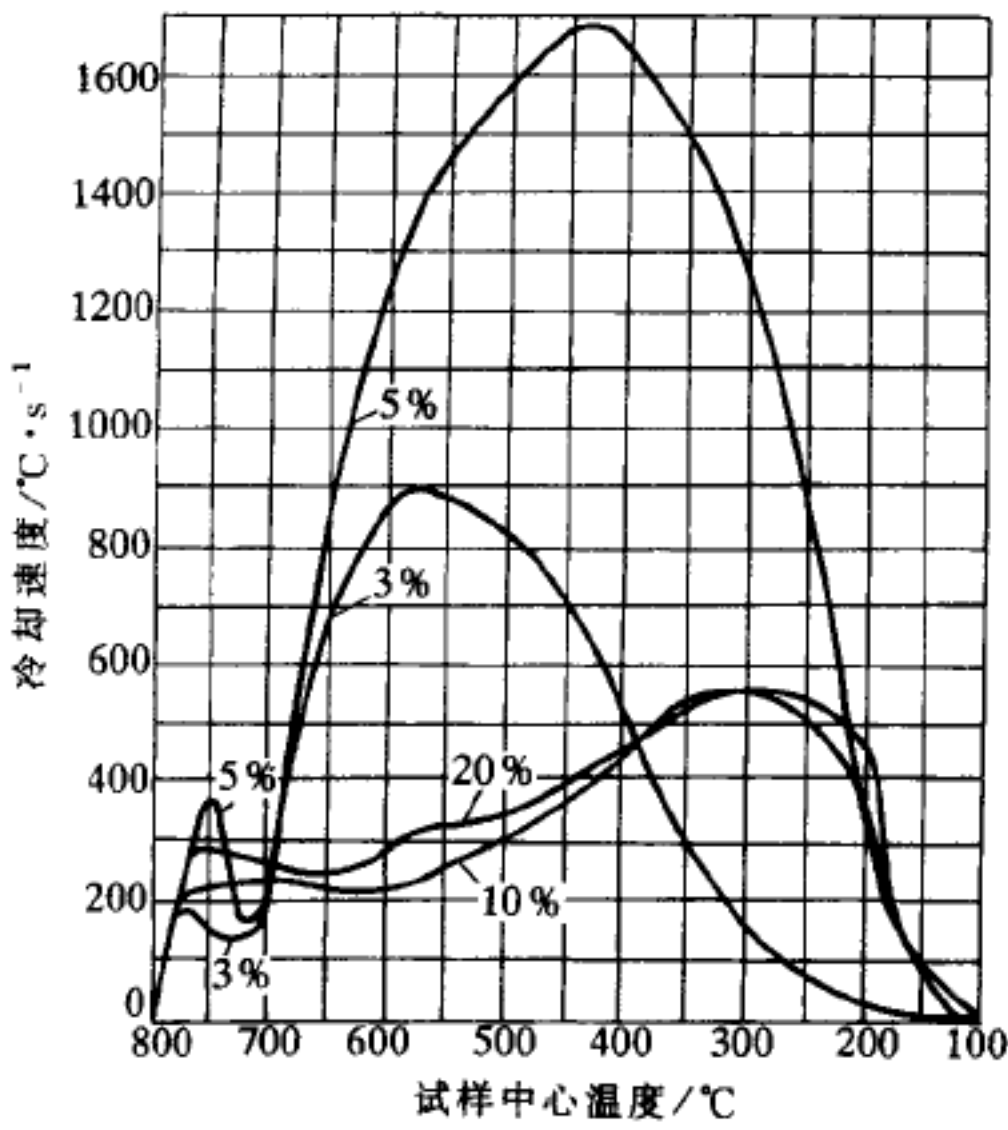


图 6-87 20℃碳酸钠水溶液 (质量分数) 的冷却能力与其浓度的关系

($\phi 20\text{mm}$ 银球试样) (15% 和 10% 曲线很接近)

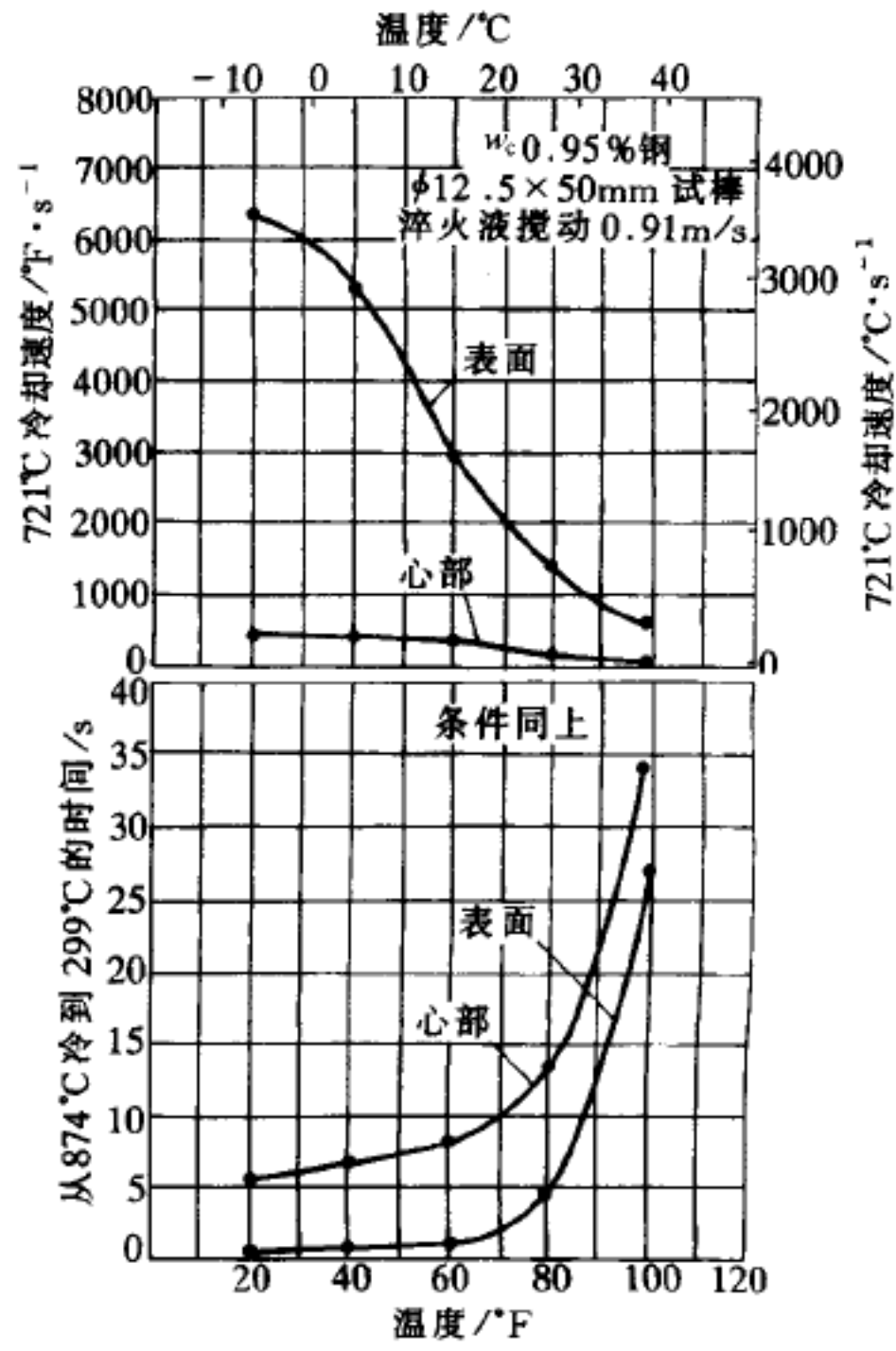


图 6-88 盐水温度对淬冷速度的影响

3. 淬火油 (表 6-28 ~ 表 6-38 和图 6-89 ~ 图 6-110)

表 6-28 机械油新旧名称和粘度等级对照表

按 40℃ 时运动粘度 (mm²/s) 分列的等级		按 50℃ 时运动粘度 (mm²/s) 分列 (VI=95 时) 的等级
L-AN N5	5	4 号高速机械油 (GB 2827 时间)
L-AN N7	7	5 号高速机械油 (GB 486)
L-AN N10	10	7 号高速机械油 (GB 486)
L-AN N15	15	10 号机械油 (GB 443)
L-AN N22	22	20 号机械油 (GB 443)
L-AN N32	32	30 号机械油 (GB 443)
L-AN N46	46	40 号机械油 (GB 443)
L-AN N68	68	50 号机械油 (GB 443)
L-AN N100	100	70 号机械油 (GB 443)
L-AN N150	150	90 号机械油 (GB 443)

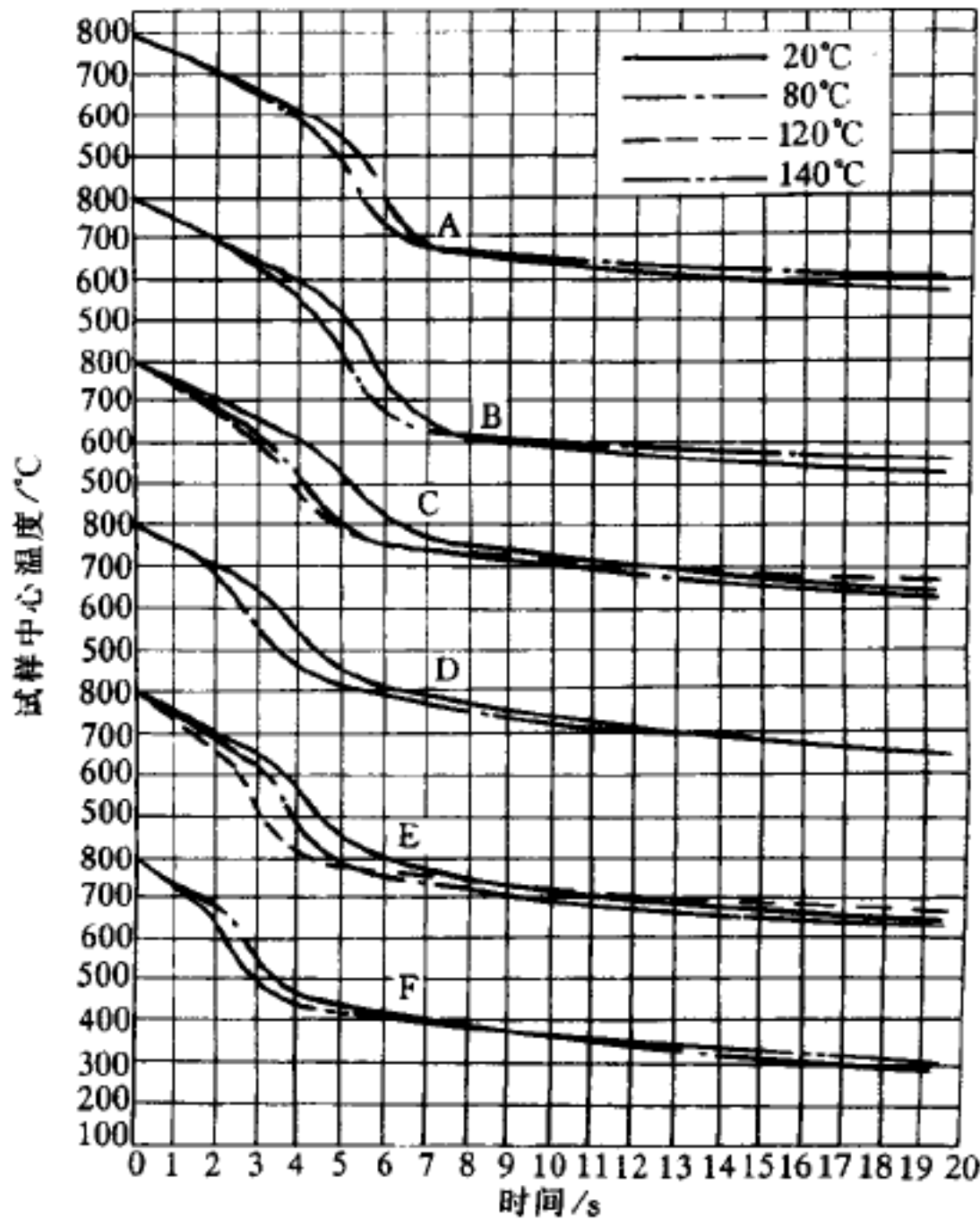


图 6-89 几种冷却油的冷却曲线
A—L-AN7 B—L-AN15 C—L-AN22
D—L-AN68 E—L-AN100 F—24 号气缸油

表 6-29 几种机械油的性能

性 能		HJ-5 5 号 高速机械油	HJ-10 10 号 机械油 (2 号锭子油)	HJ-20 20 号 机械油 (3 号锭子油)	HJ-40 40 号 机械油	HJ-50 50 号 机械油	HG24 24 号 气缸油
运动粘度 $/\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	50℃	4.1 ~ 5.1	7 ~ 13	17 ~ 23	37 ~ 43	47 ~ 53	
	100℃						20 ~ 28
闪点/℃		110	165	170	190	200	240
凝点/℃		-10	-15	-15	-10	-10	-15
灰分 (%)		0.005	0.007	0.007	0.007	0.007	0.02
使用温度/℃		20 ~ 80	20 ~ 80	20 ~ 80	80 ~ 120	80 ~ 140	

表 6-30 国产普通淬火油的技术性能指标

分 析 项 目		1 号普通淬火油	2 号普通淬火油	快速淬火油	试验方法
运动粘度	(50℃) $/\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	8 ~ 12	10 ~ 16	10 ~ 15	GB/T265—1988
	(40℃) $/\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	30	26	15 ~ 22	
闪点 (开口) /℃ >		170	170	170	GB/T267—1988
水分 (%)		无	无	无	GB/T260—1977
凝固点/℃				-10	GB/T510—1983
残炭 % <		0.2	0.4	0.65	GB/T268—1987
酸值 $/\text{mgKOH} \cdot \text{g}^{-1}$ <		0.10	0.10	0.20	GB/T264—1983
热氧化安定性	粘度比 <	1.5	1.5	1.5	辽 Q456—80
	残炭增加值 < (%)	1.5	1.5	1.5	
冷却性能	特性温度/℃	480	580	620	辽 Q457—80 采用 ZJY—10 探头 ($\phi 10\text{mm} \times 30\text{mm}$)
	特性时间/s	4.7	3.8	3.0	
	800 ~ 400℃/s	5.0	4.5	3.7	

表 6-31 等温、分级淬火油的性能指标

分 析 项 目		1 号热油	DF2—A ^①	DF2—S ^①	试验方法
运动粘度	(50℃) $/\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	50 ~ 56	86 ~ 100	66 ~ 72	GB/T265—1998
	(100℃) $/\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	20	14 ~ 17	11 ~ 14	
闪点 (开口) /℃ >		200	280	260	GB/T267—1998
凝固点/℃ <		—	-10	-10	GB/T510—1983
水分 (%) <		无	痕迹	痕迹	GB/T260—1977
残炭 (%) <		0.6	0.15	0.15	GB/T268—1987
酸值 $/\text{mgKOH} \cdot \text{g}^{-1}$ <		0.35	—	—	GB/T264—1983
热氧化安定性	粘度比 <	1.5	1.5	1.5	辽 Q456—80
	残炭增值 (%) <	2.0	1.5	1.5	
冷却性能	特性温度/℃ >	600	610	620	辽 Q456—120
	特性时间/s <		2.5	2.2	
	800 ~ 400℃冷却/s	5.0	5.0	4.5	

① 为光亮等温分级淬火油。

表 6-32 2 号普通淬火油与 L—AN15 (10 号机械油) 和 L—AN32 (20 号机械油) 的冷却能力

冷却能力	普通 2 号淬火油	L—AN15 (10 号机械油)	L—AN32 (20 号机械油)
特性温度/℃	633	460	490
特性时间/s	2.25	4.8	4.75
800 ~ 400℃ 冷却/s	3.15	5.05	5.25
800 ~ 300℃ 冷却/s	4.55	7.2	8.85

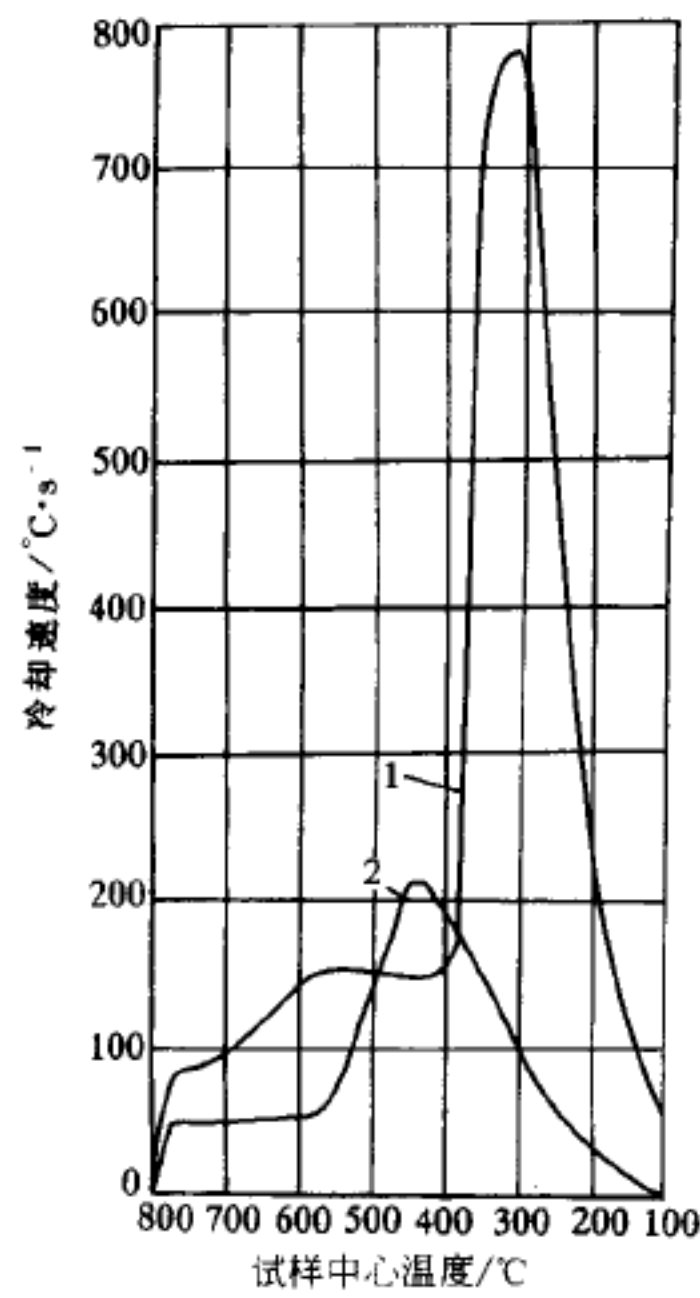


图 6-90 20℃水与 20℃L—AN15 (10 号机械油) 的冷却能力对比 (φ20mm 银球)
1—水 2—L—AN15 (10 号机械油)

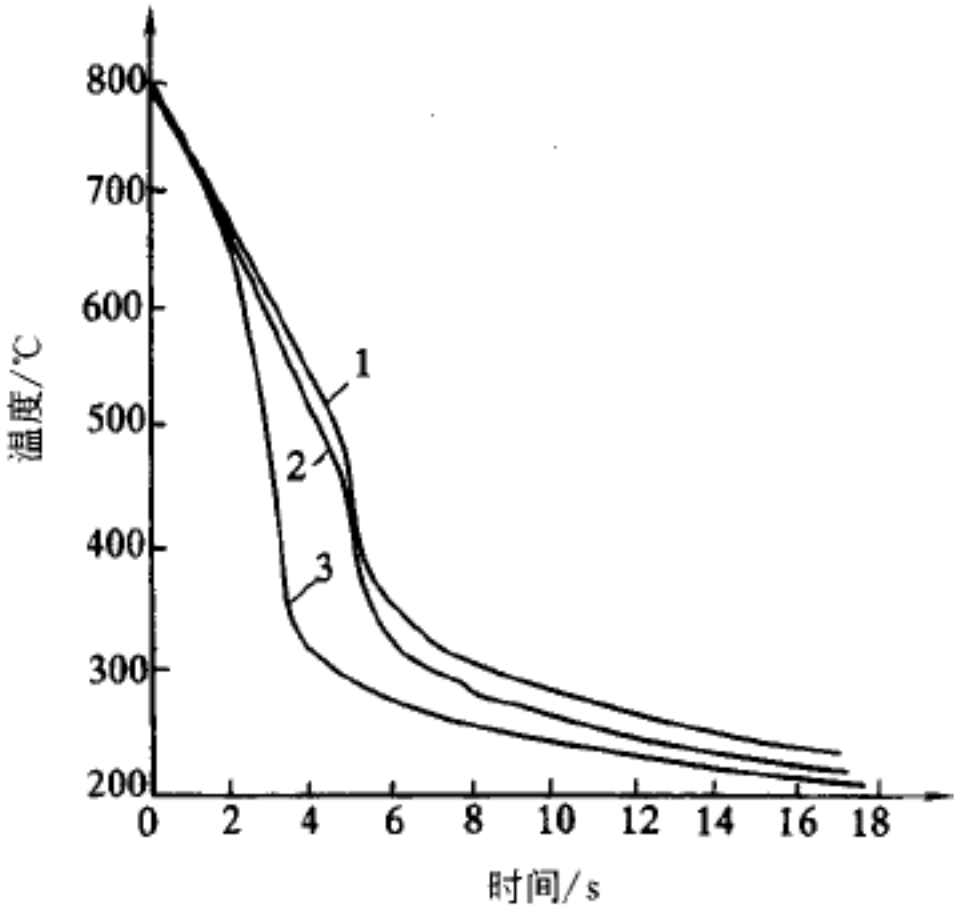


图 6-91 P2—2淬火油与 L—AN15、
L—AN32 (10、20 号机械油) 的冷却曲线
(φ10mm × 30mm 银棒)
1—L—AN32 (20 号机油) 2—L—AN15
(10 号机油) 3—P2—2号淬火油

表 6-33 国产光亮淬火油性能指标

分 析 项 目		1 号 (GZ—1) 光亮淬火油	2 号 (GZ—2) 光亮淬火油	快速光亮淬火油	试验方法
运动粘度 (50℃) /mm ² ·s ⁻¹		7 ~ 13	17 ~ 23	20 ~ 25	GB/T265—1988
闪点 (开口) /℃ >		170	180	180	GB/T267—1988
水分 (%)		无	无	无	GB/T260—1977
凝固点/℃		- 10	- 10	- 21	GB/T510—1983
残炭 (%) <		0.2	0.1	0.08	GB/T268—1987
酸值/mgKOH·g ⁻¹ <		0.7	0.7	0.5	GB/T264—1983
热氧化安定性	粘度比 <	1.5	1.5	1.5	辽 Q456—1980
	残炭增加值 (%) <	1.5	1.5	1.5	
冷却性能	特性温度/℃	500	500	600	辽 Q457—1980 2JY—10 探头
	特性时间/s	5.5	4.0		
	800 ~ 400℃/s	4.5	4.5	4.0	

表 6-34 常用光亮添加剂

添加剂名称	一般添加量 (质量分数)	添加剂名称	一般添加量 (质量分数)
咪唑啉油酸酯	0.5% ~ 1%	2、6 二叔丁基对甲酚	0.3%
聚异丁烯丁二酰亚胺	0.5% ~ 1%	二烷基二硫磷酸锌	—
二硫磷酸酯	1%		

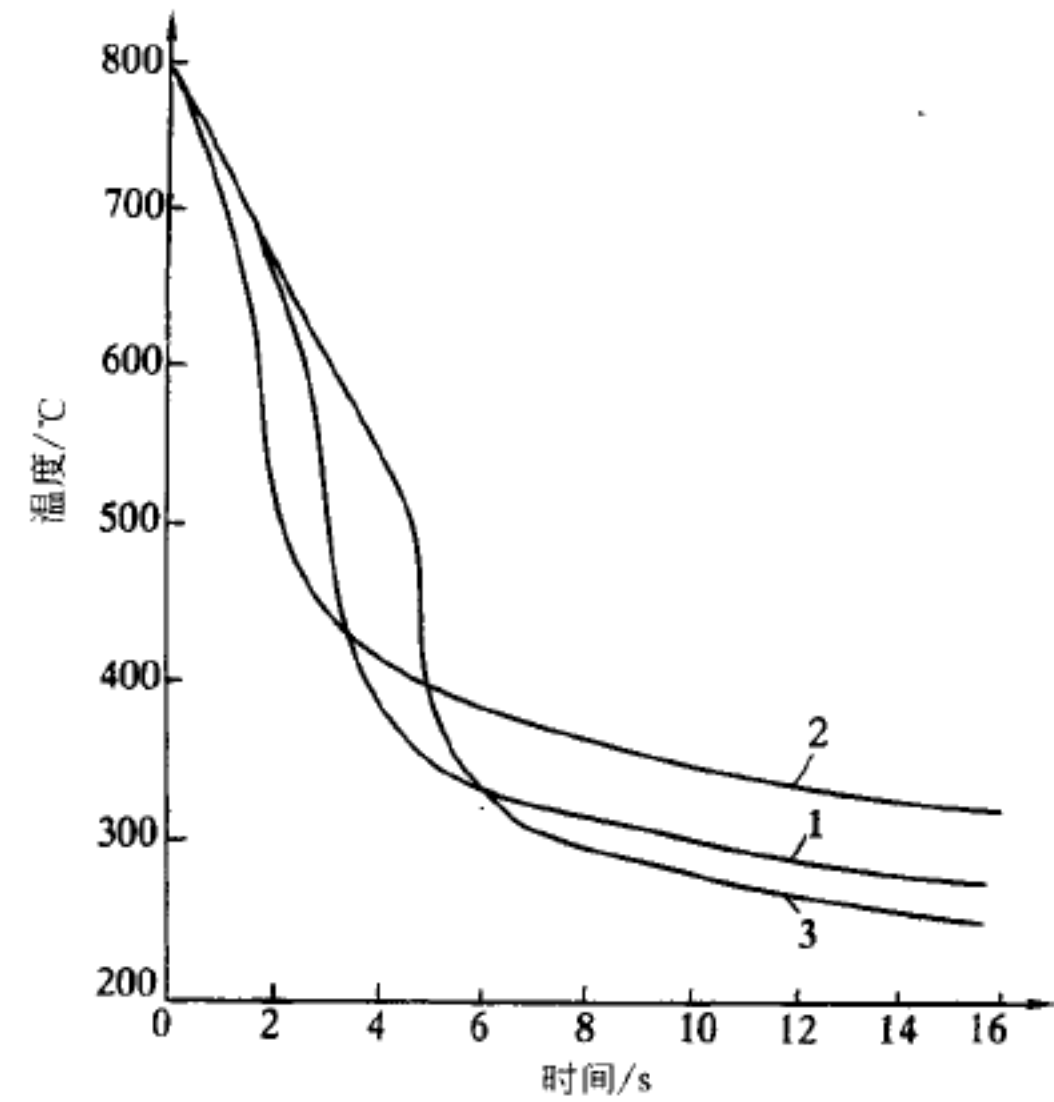


图 6-92 几种油的冷却曲线
($\phi 10\text{mm} \times 30\text{mm}$ 银棒)
1—分级淬火油 120℃ 2—52 号汽缸油 140℃ 3—掺合油 80℃

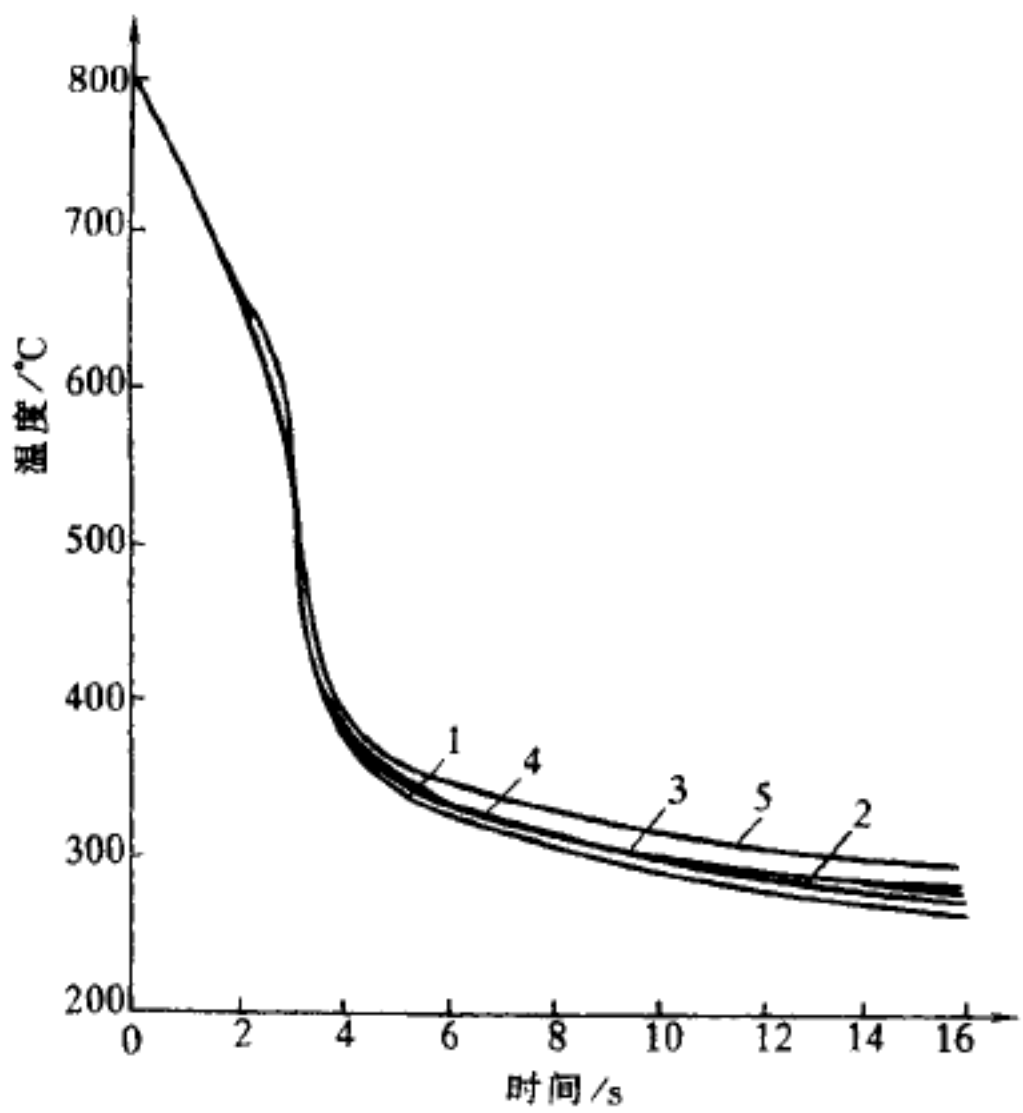


图 6-93 油温对冷却曲线的影响
($\phi 10\text{mm} \times 30\text{mm}$ 银棒)
1—100℃ 2—120℃ 3—140℃
4—160℃ 5—180℃

表 6-35 淬火油成分对其物理性质的影响

性 质	淬火油牌号				性 质	淬火油牌号			
	MZM—16	1—20A	1—20AR1	1—20AR2		MZM—16	1—20A	1—20AR1	1—20AR2
碳氢化合物成分(%)					IV	3.50	2.00	3.84	1.40
石蜡—环烷烃	73.70	71.48	67.04	62.25	树脂	0.50	2.10	4.00	4.10
芳香族					挥发物	0.40	0.66	2.96	1.48
I	11.30	11.96	11.60	16.00	粘度(50℃)/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	17.50	18.30	24.80	25.60
II	6.70	7.80	3.16	10.58	氧化试验,减重(%)	1.54	1.80	2.20	3.00
III	3.80	4.00	2.80	4.20					

表 6-36 两种等温淬火油的物理性质

性 质	等温淬火油		性 质	等温淬火油	
	I	II		I	II
工作温度/℃	95 ~ 150	150 ~ 250	175℃	—	42 ~ 43
最低闪点/℃	210	275	205℃	—	38 ~ 39
最低燃点/℃	245	310	230℃	—	35 ~ 36
赛氏粘度 (SUS) /s			粘度指数 (最小)	95	95
38℃	235 ~ 575	—	酸价	0.00	0.00
100℃	50.5 ~ 51	118 ~ 122	残炭	0.05	0.45
150℃	36.5 ~ 37.5	51 ~ 52			

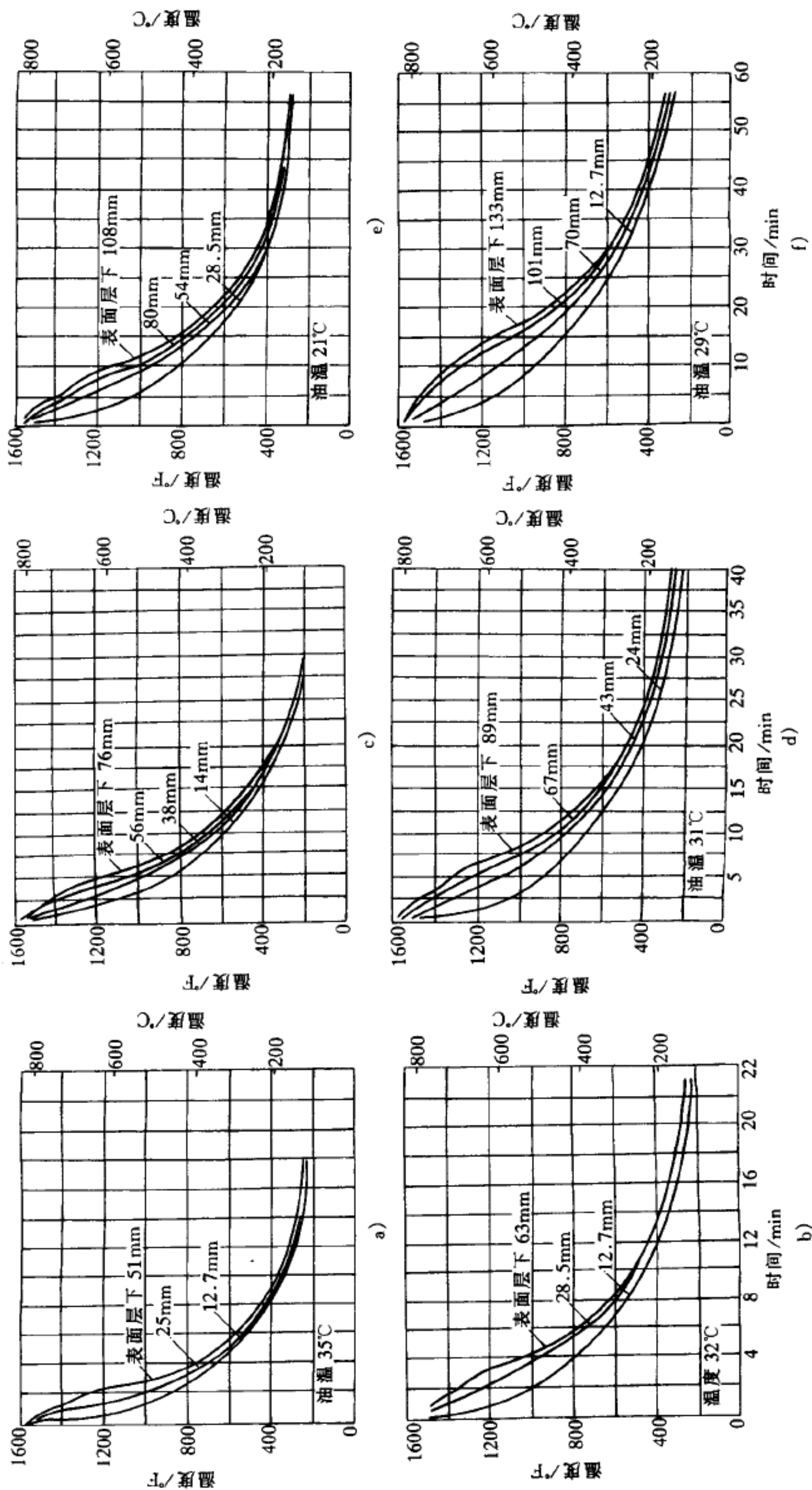


图 6-94 工件在普通淬火油中淬火时质量和尺寸对冷却曲线的影响

a) 1045 钢 $\phi 101\text{mm}$ 约重 19.5kg b) 1035 钢 $\phi 127\text{mm}$ 约重 38.5kg c) 1020 钢 $\phi 152\text{mm}$ 约重 62kg

d) 1040 钢 $\phi 178\text{mm}$ 约重 104kg e) 1040 钢 $\phi 210\text{mm}$ 约重 186kg f) 1040 钢 $\phi 266\text{mm}$ 约重 333kg

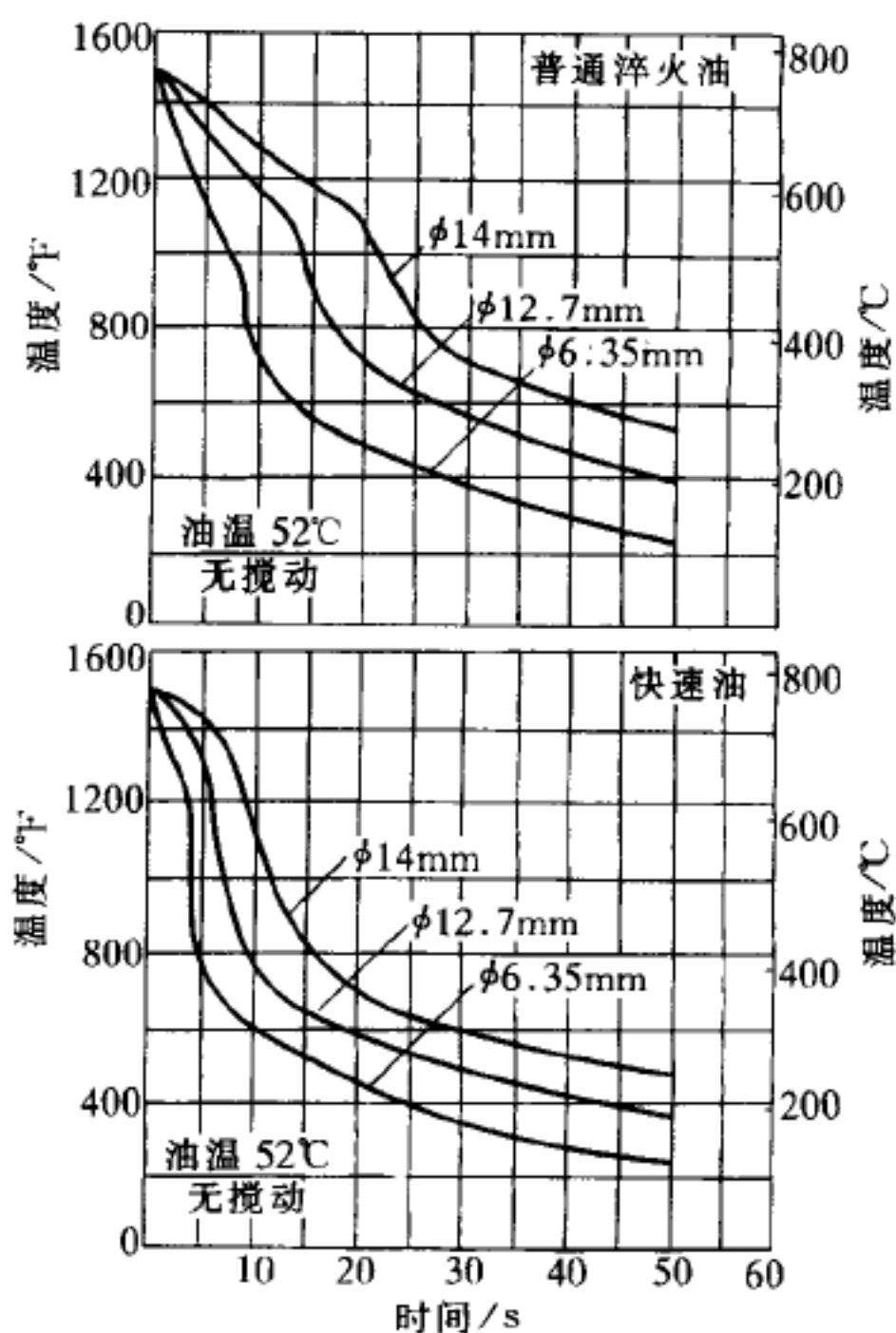


图 6-95 不同直径 63mm 长奥氏体
不锈钢棒冷却曲线

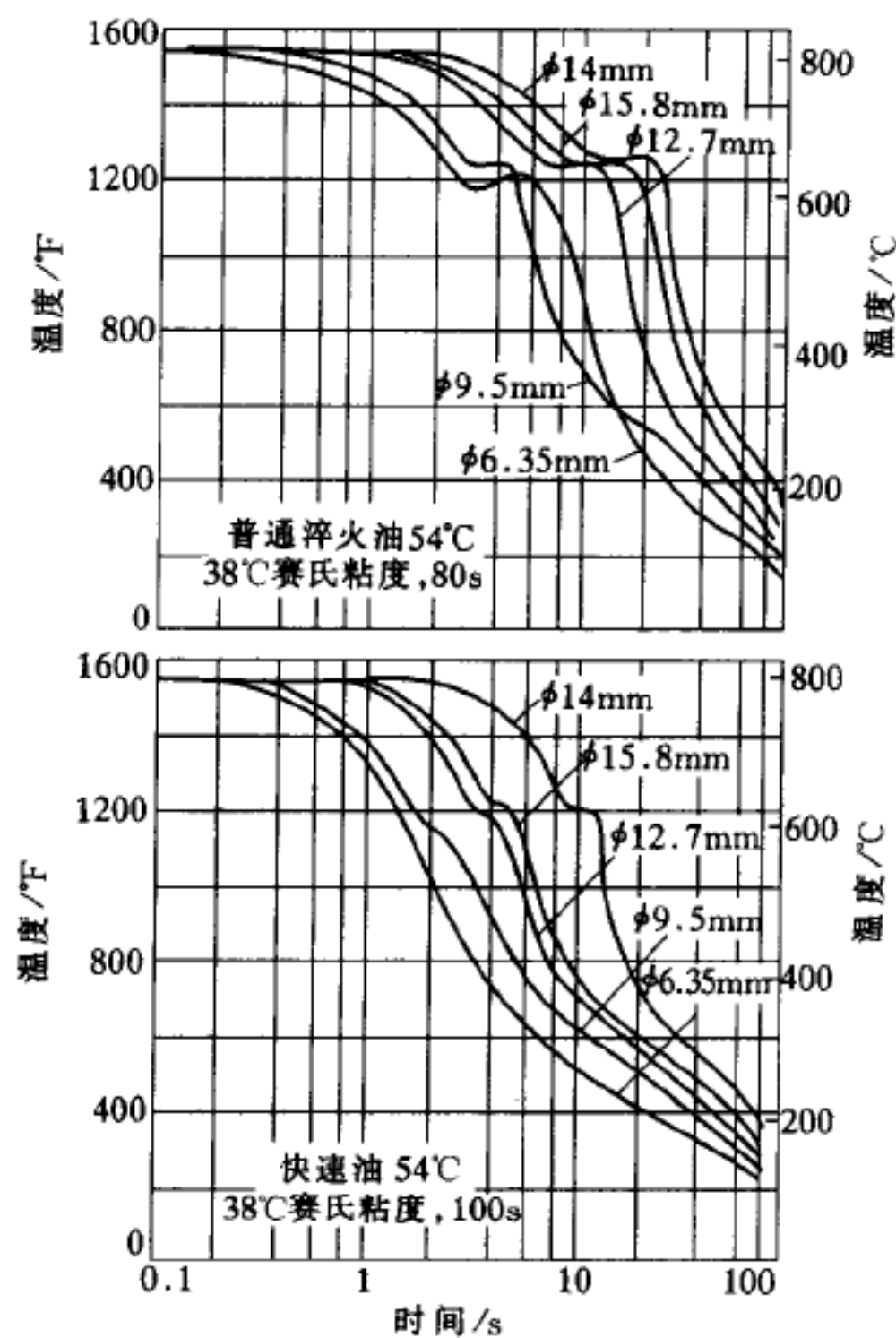


图 6-96 100mm 长不同直径钻
杆的冷却曲线

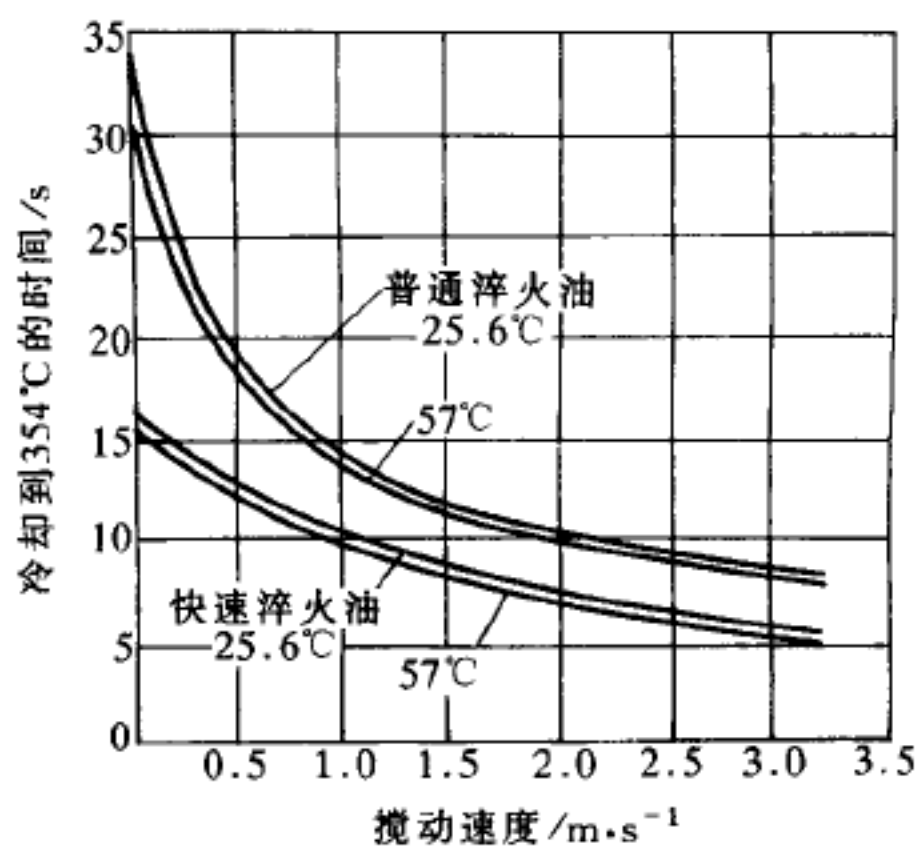


图 6-97 搅动速度对钢在淬火油中冷却速度的影响 (354°C 为镍球的磁性居里点)

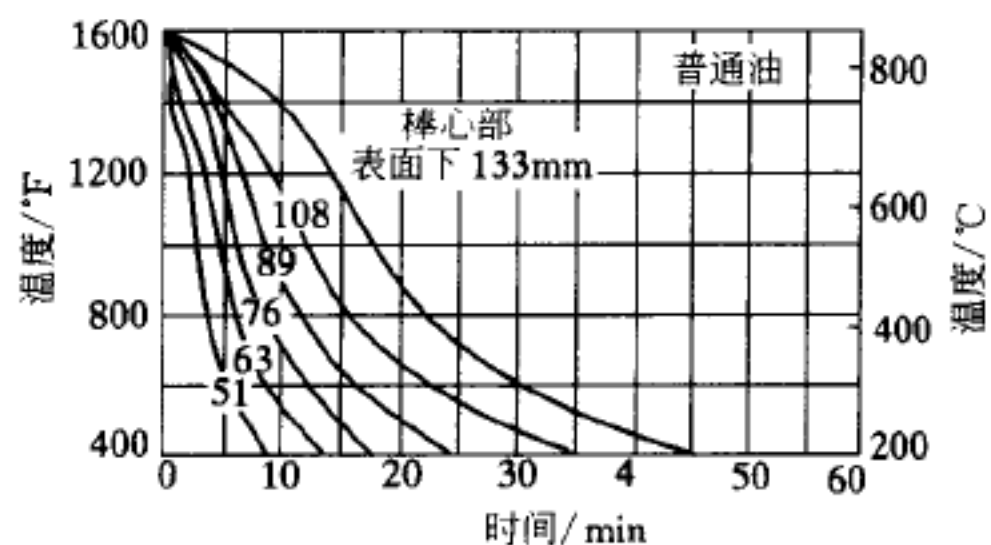


图 6-98 钢棒表面层下不同深度在油中的冷却曲线

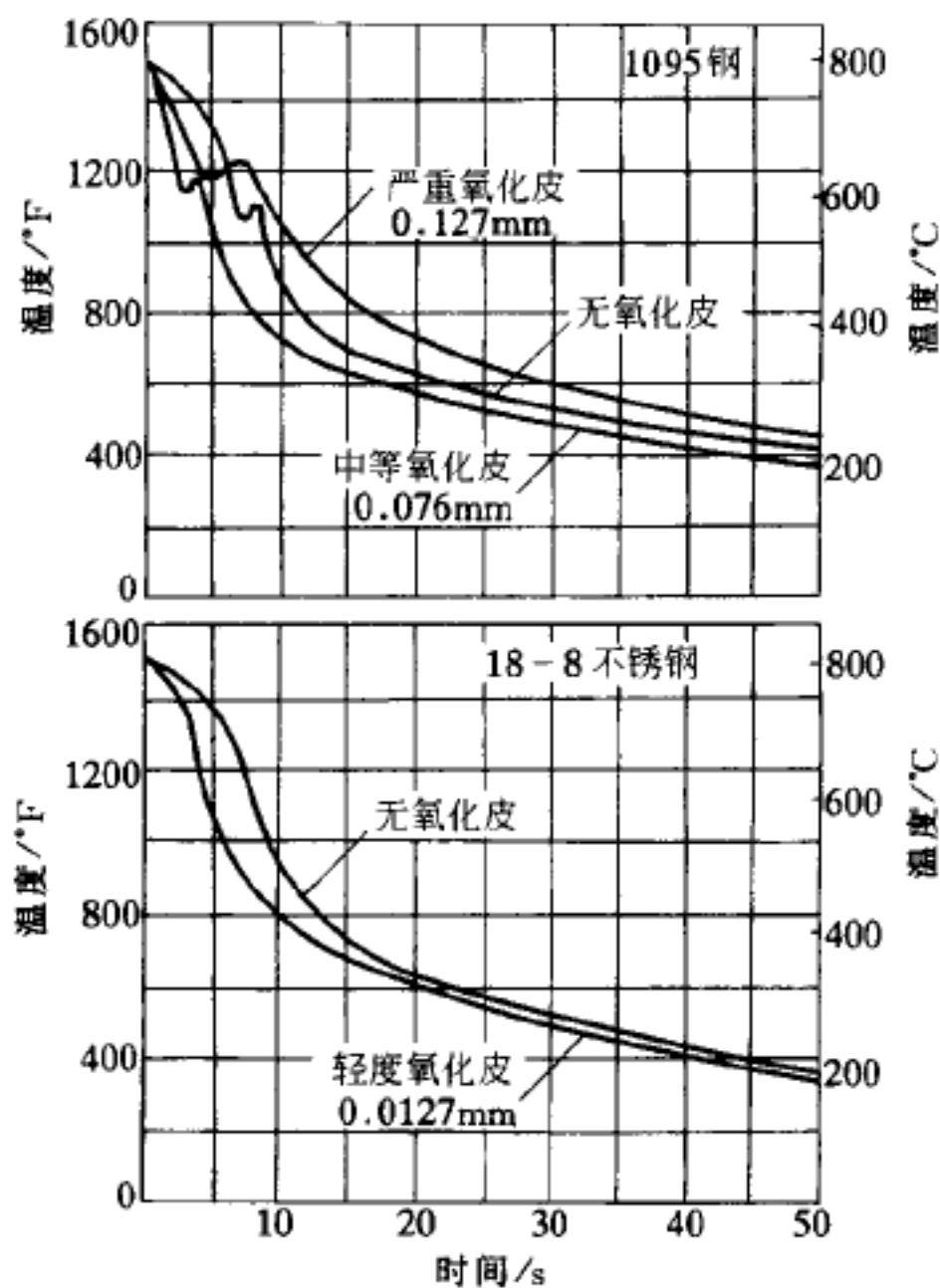


图 6-99 1095 钢和 18-8 不锈钢棒表面氧化程度在不搅动快速淬火油中的冷却曲线 (1095 钢淬火油温 52℃, 不锈钢 24℃, 试棒尺寸 $\phi 12.7\text{mm} \times 63\text{mm}$)

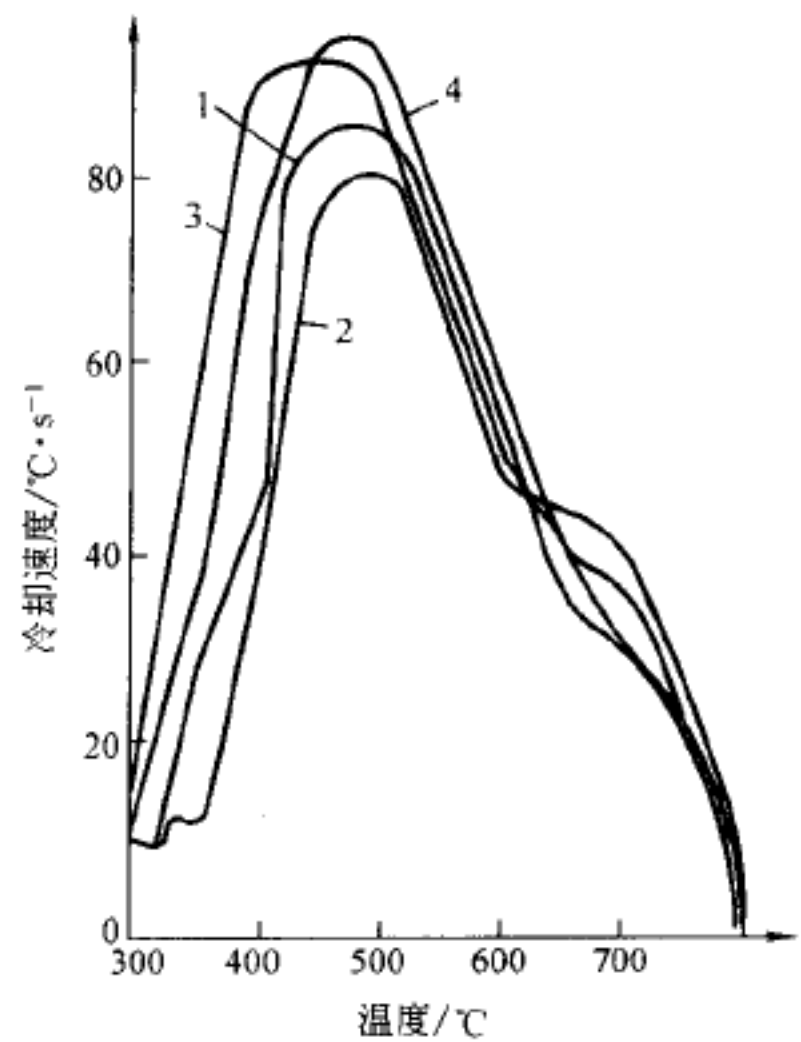


图 6-100 淬火油成分对冷却速度的影响
1—MZM—16 2—1—20 3—1—20AR
4—1—20AR2

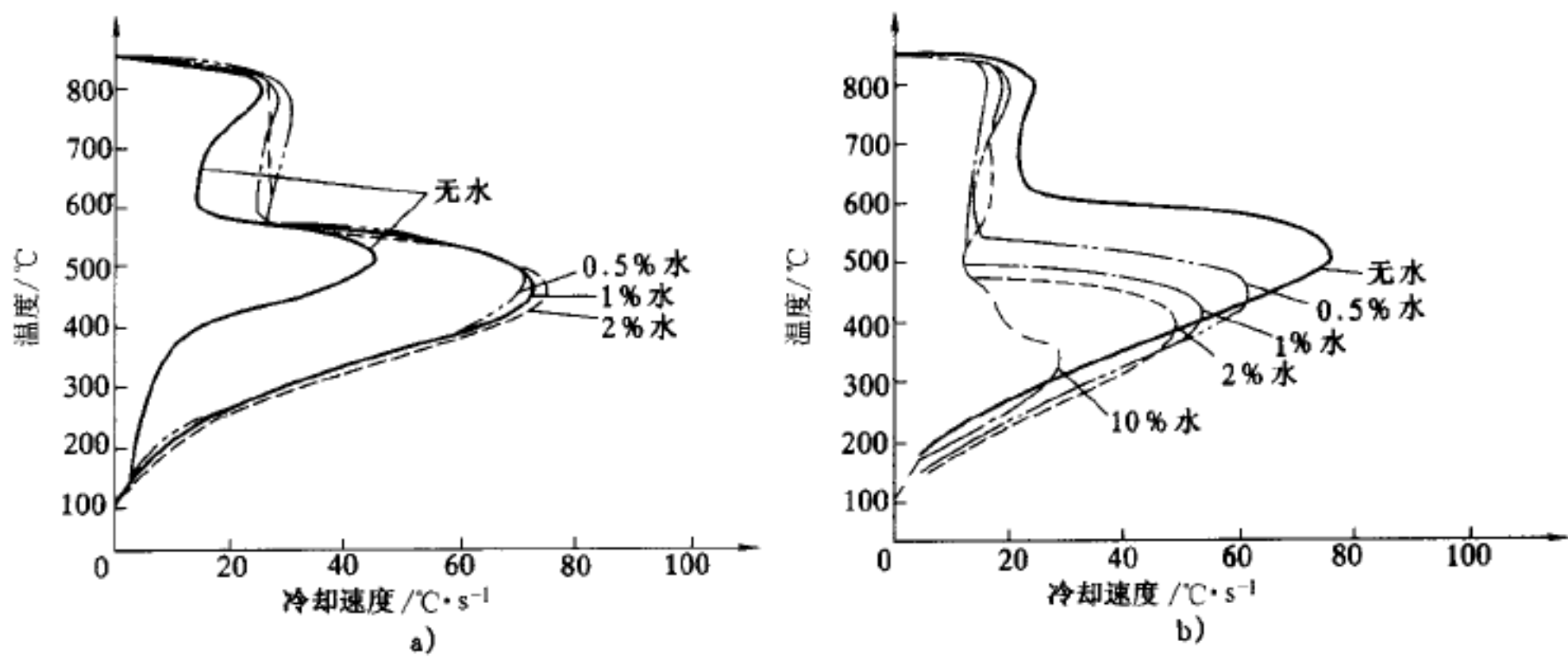


图 6-101 普通淬火油图 a) 和快速淬火油图 b) 被水污染后的冷却性能

表 6-37 国产真空淬火油的性能指标

分析项目	1 号真空 淬火油	2 号真空 淬火油	试验方法	分析项目	1 号真空 淬火油	2 号真空 淬火油	试验方法
运动粘度(50℃)/ $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	20 ~ 25	50 ~ 55	GB/T265—1988	饱和蒸汽压 (20℃, $\times 133.3\text{Pa}$) <	5×10^{-5}	5×10^{-5}	SY2672— 77
闪点(0℃)(开口) >	170	210	GB/T267—1988	热氧化 粘度比 <	1.5	1.5	辽 Q456
水分 (%)	无	无	GB/T260—1977	安定性 残炭增值 (%)	1.5	1.5	辽 Q456
凝固点/℃ <	- 10	- 10	GB/T510—1983	冷却性能 特性温度/℃ >	600	580	辽 Q457
残炭 (%) <	0.08	0.10	GB/T268—1987	特性时间/s <	3.5	4.0	辽 Q457
酸值/ $\text{mgKOH} \cdot \text{g}^{-1}$ <	0.5	0.7	GB/T264—1983	800 ~ 400℃ 冷却/s	5.5	7.5	辽 Q457

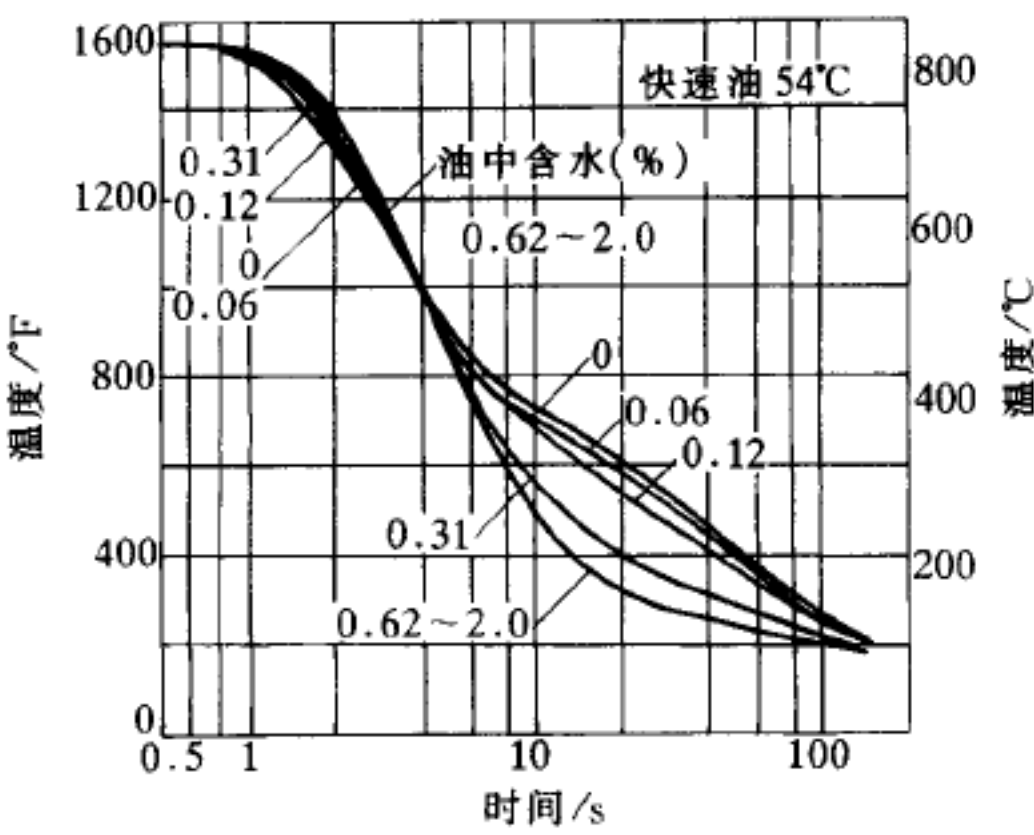


图 6-102 快速淬火油被水污染的影响
($\phi 12.7\text{mm} \times 101\text{mm}$ 304 不锈钢试棒在静止快速油中淬火时的心部冷却曲线)

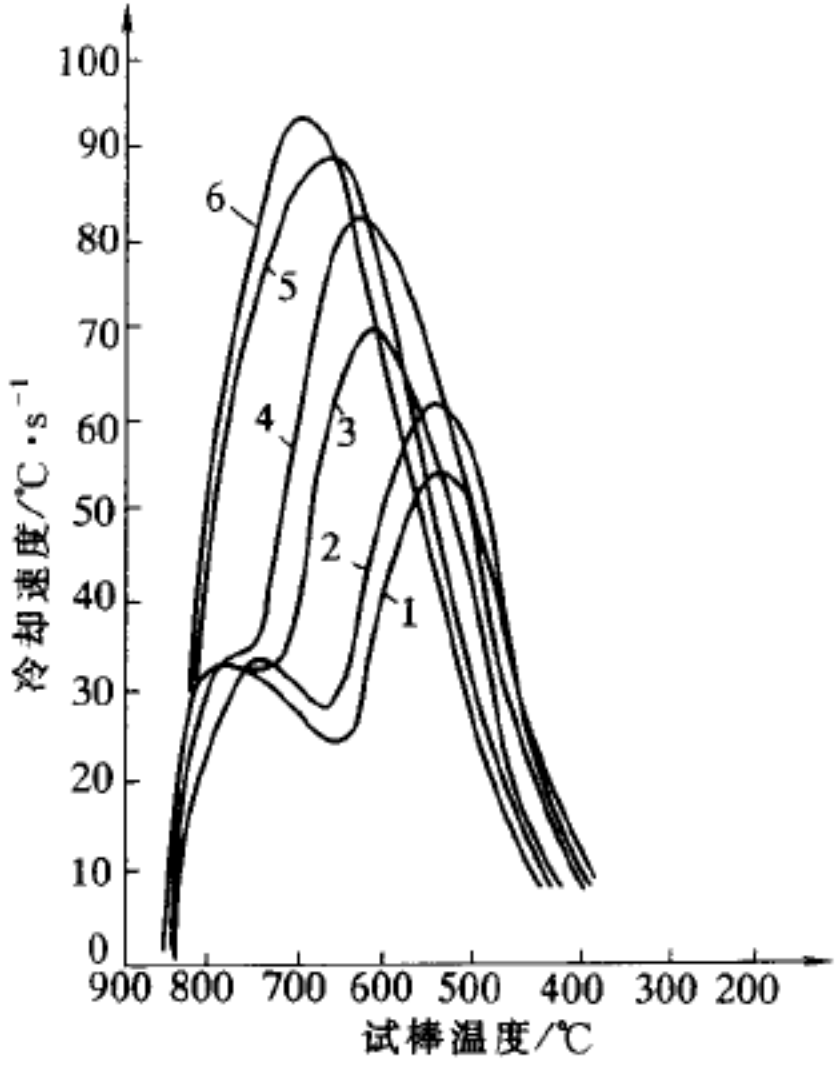


图 6-103 快速淬火油冷却速度随使用时间的变化
1—新油 2—3个月 3—7个月 4—15个月
5—25个月 6—34个月

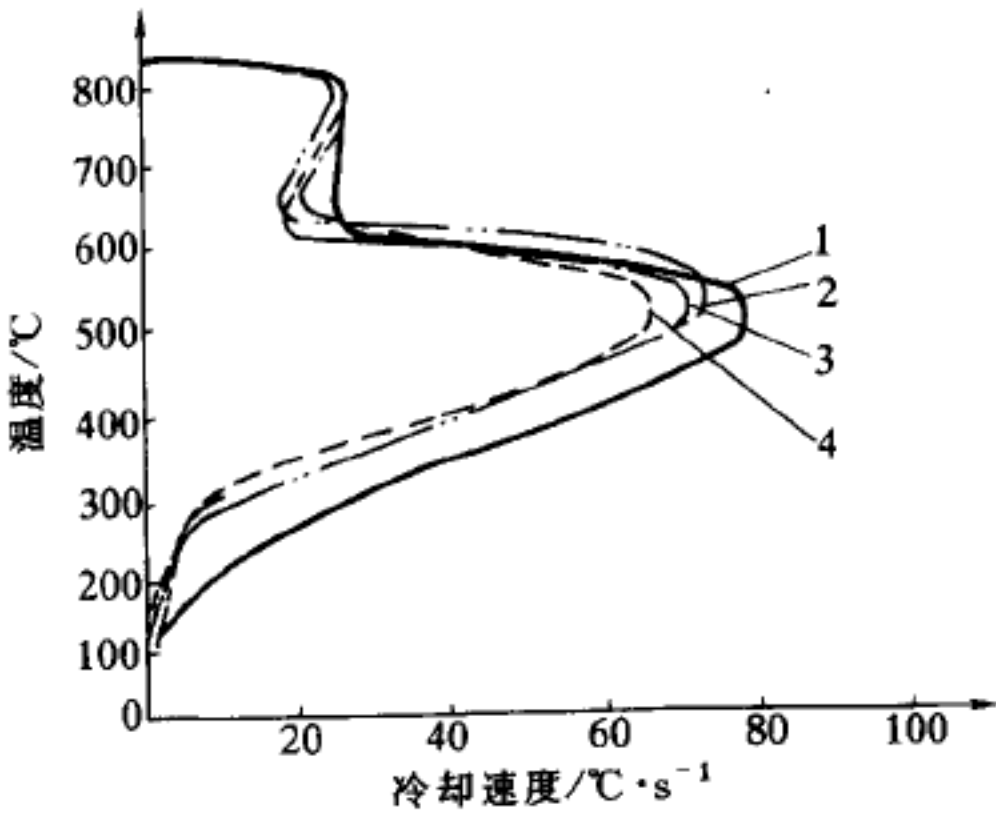


图 6-104 普通淬火油冷却曲线随使用时间的变化
1—新油 2—3个月 3—6个月 4—9个月

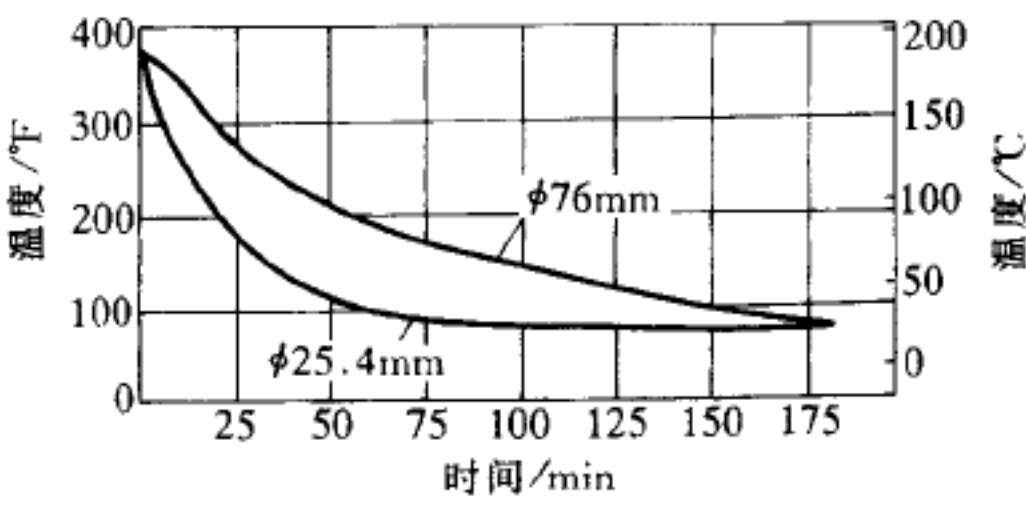


图 6-105 190°C 分级淬火后工件尺寸对随后在 25°C 空冷时间的影响 (测表面温度)

表 6-38 在普通淬火油中添加磷酸钠的效果^①

冷却性能	磷酸钠(质量分数)(%)		
	0	1.5	3.0
膜冷却期/s	36.5	21.5	16.5
完成膜冷却期的平均温度/°C	600	650	650
平均核沸腾速率/°C·s ⁻¹	10.4	14.2	20.5
最大表面传热系数/W·(m ² ·K) ⁻¹	921	1779	2592
最大表面传热率的温度/°C	476	425	400
运动粘度(40°C)/×10 ⁻⁶ m ² ·s ⁻¹	32	33	34
表面张力/N·m ⁻¹	0.0388	0.0334	0.0326

① 静止油中的冷却性能。用不锈钢片 ($w_{Si}0.29\%$, $w_{Mn}1.16\%$, $w_{Cr}17.43\%$, $w_{Mo}2.29\%$, $w_{Ni}10.56\%$) $120\text{mm} \times 120\text{mm} \times 20\text{mm}$ 试样测冷速。

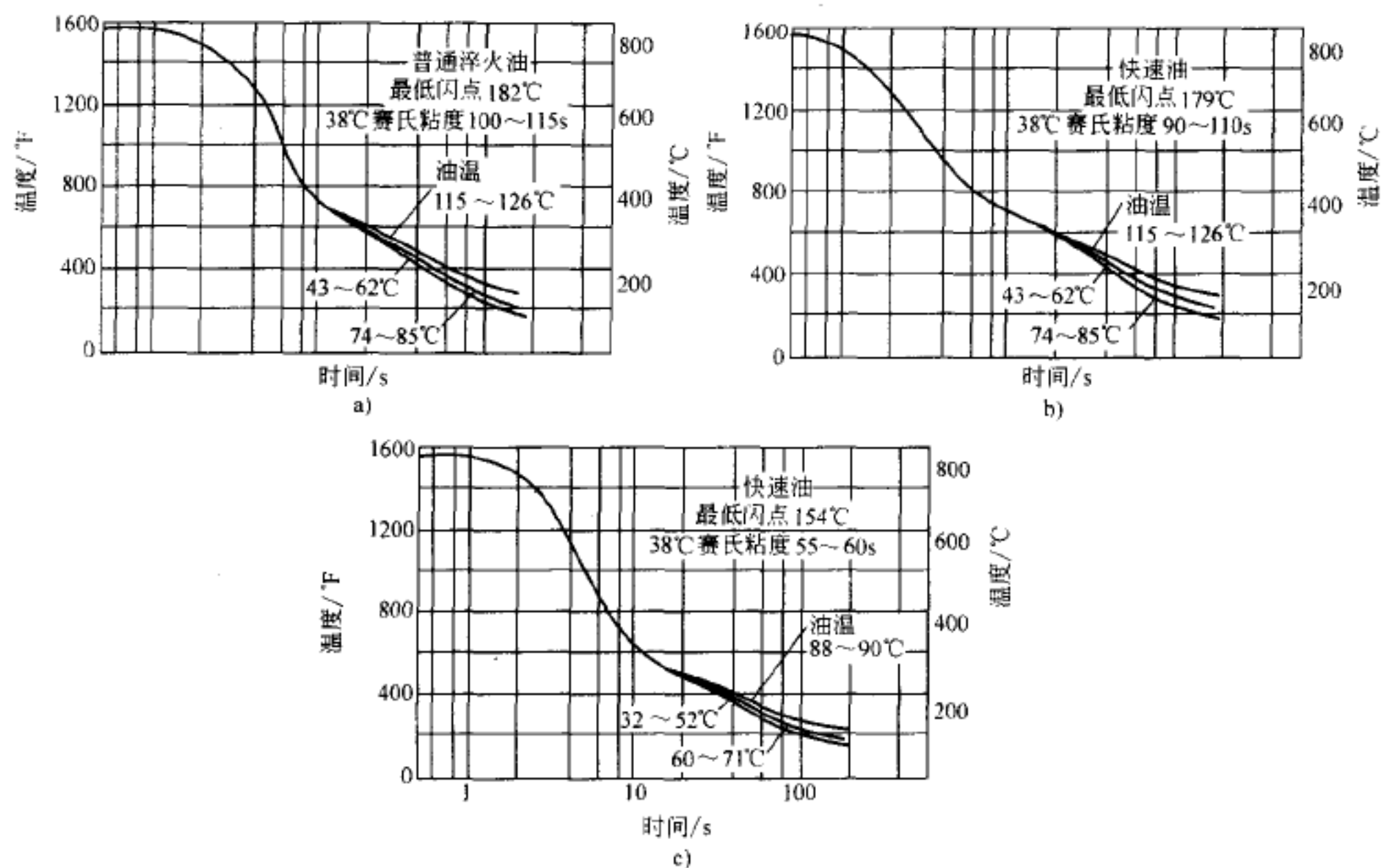


图 6-106 $\phi 12.7\text{mm} \times 101\text{mm}$ 304 不锈钢试棒在不同温度油中淬火时的心部冷却曲线

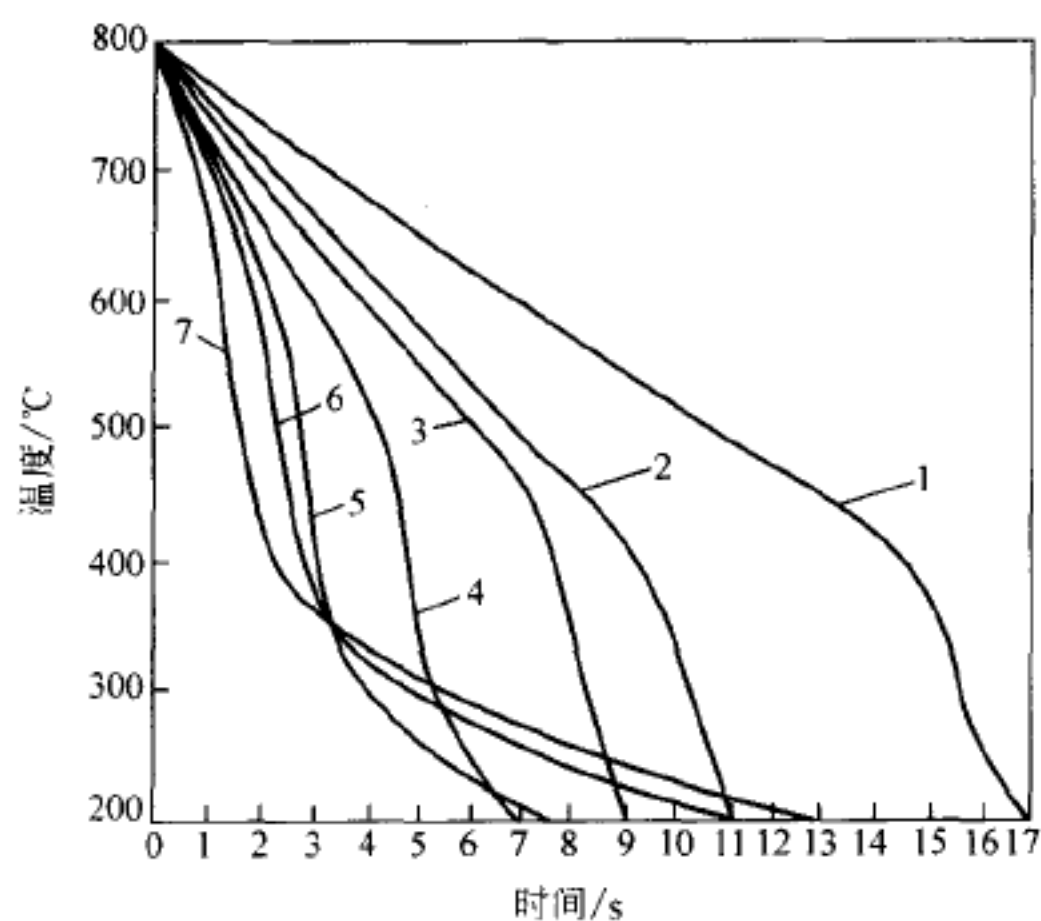


图 6-107 1 号真空淬火油不同真空度下的冷却曲线
1—0.013kPa 2—5kPa 3—10kPa 4—26.6kPa
5—50kPa 6—66.6kPa 7—101kPa

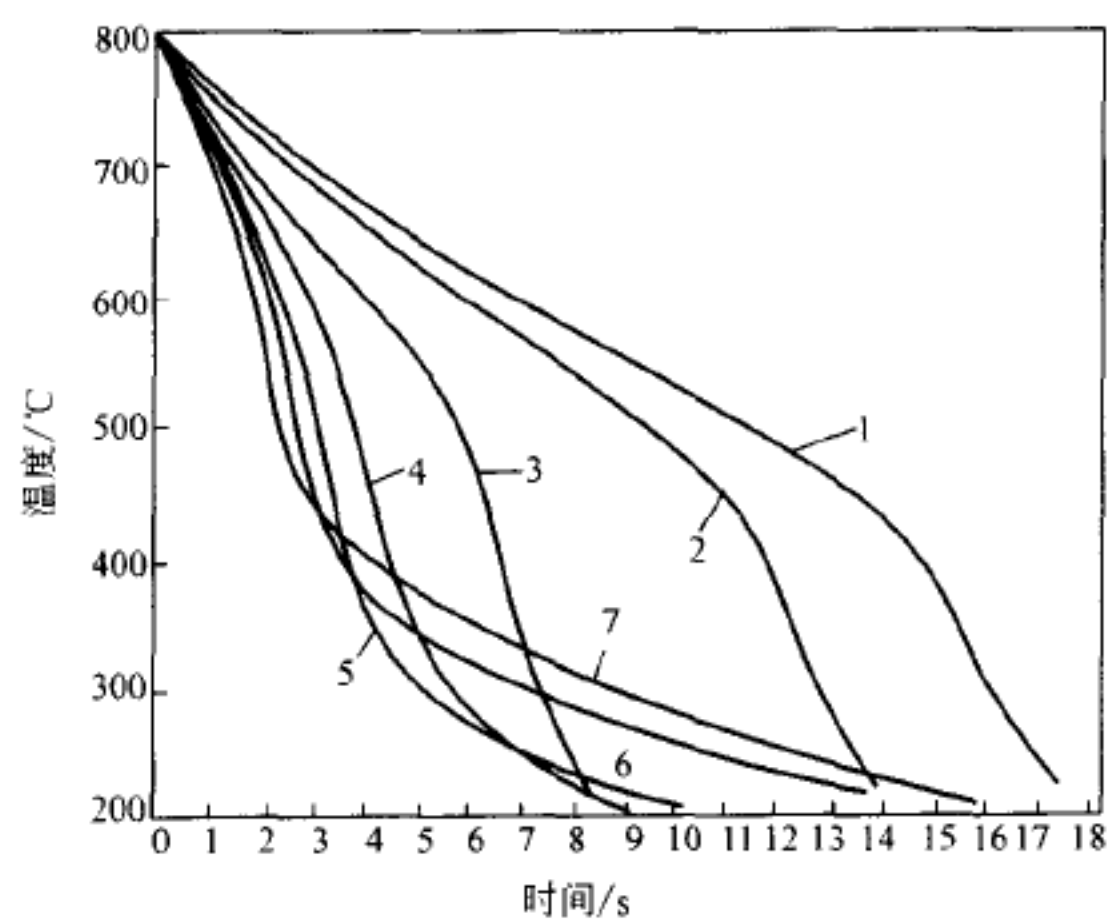


图 6-108 2 号真空淬火油不同真空度下的冷却曲线
1—0.013kPa 2—5kPa 3—10kPa 4—26.6kPa
5—50kPa 6—66.6kPa 7—101kPa

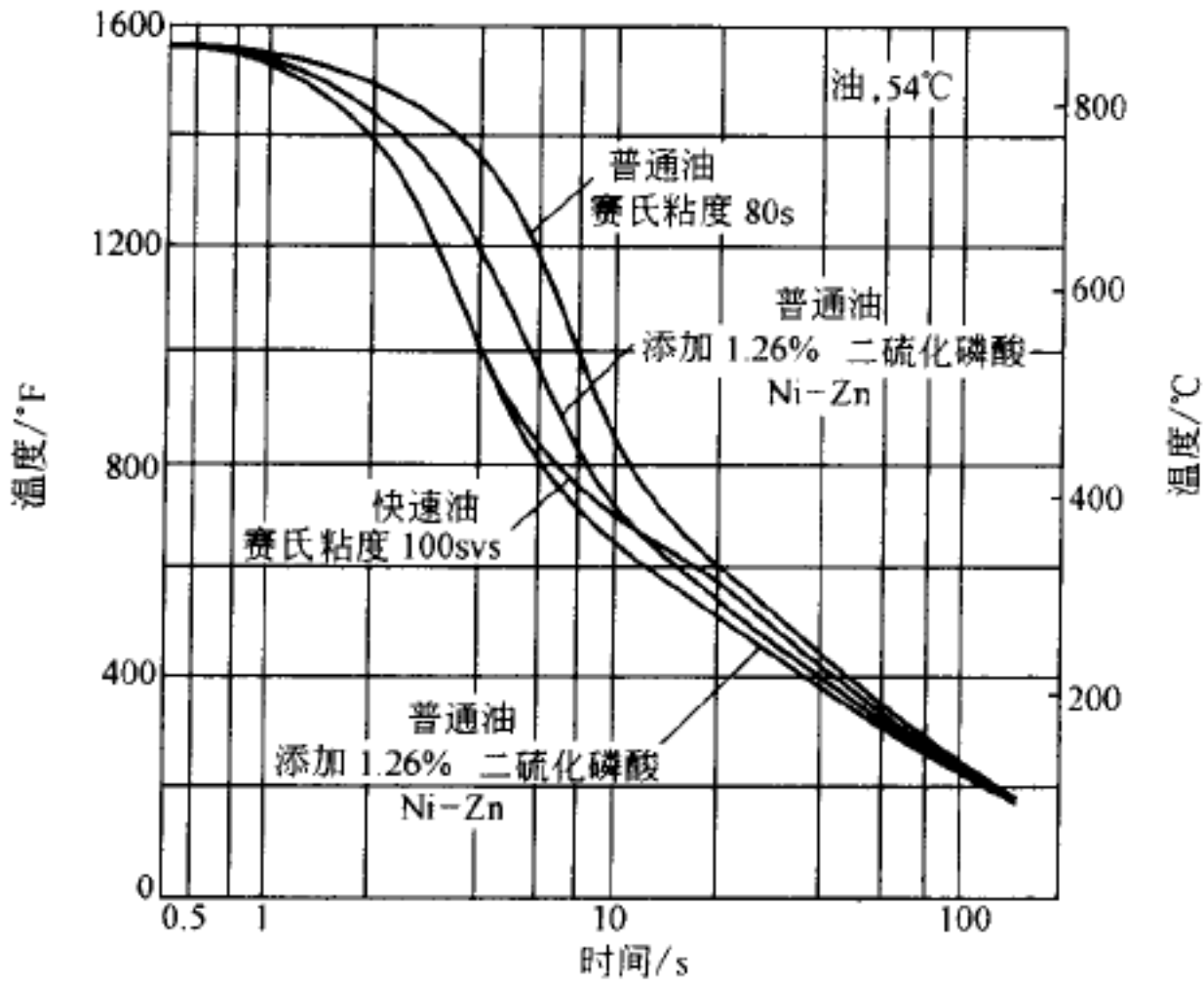


图 6-109 $\phi 12.7\text{mm} \times 101\text{mm}$ 304 不锈钢棒在 54℃ 普通淬火油和快速淬火油中淬火时，添加二硫化磷酸镍-锌对试棒心部冷却曲线的影响

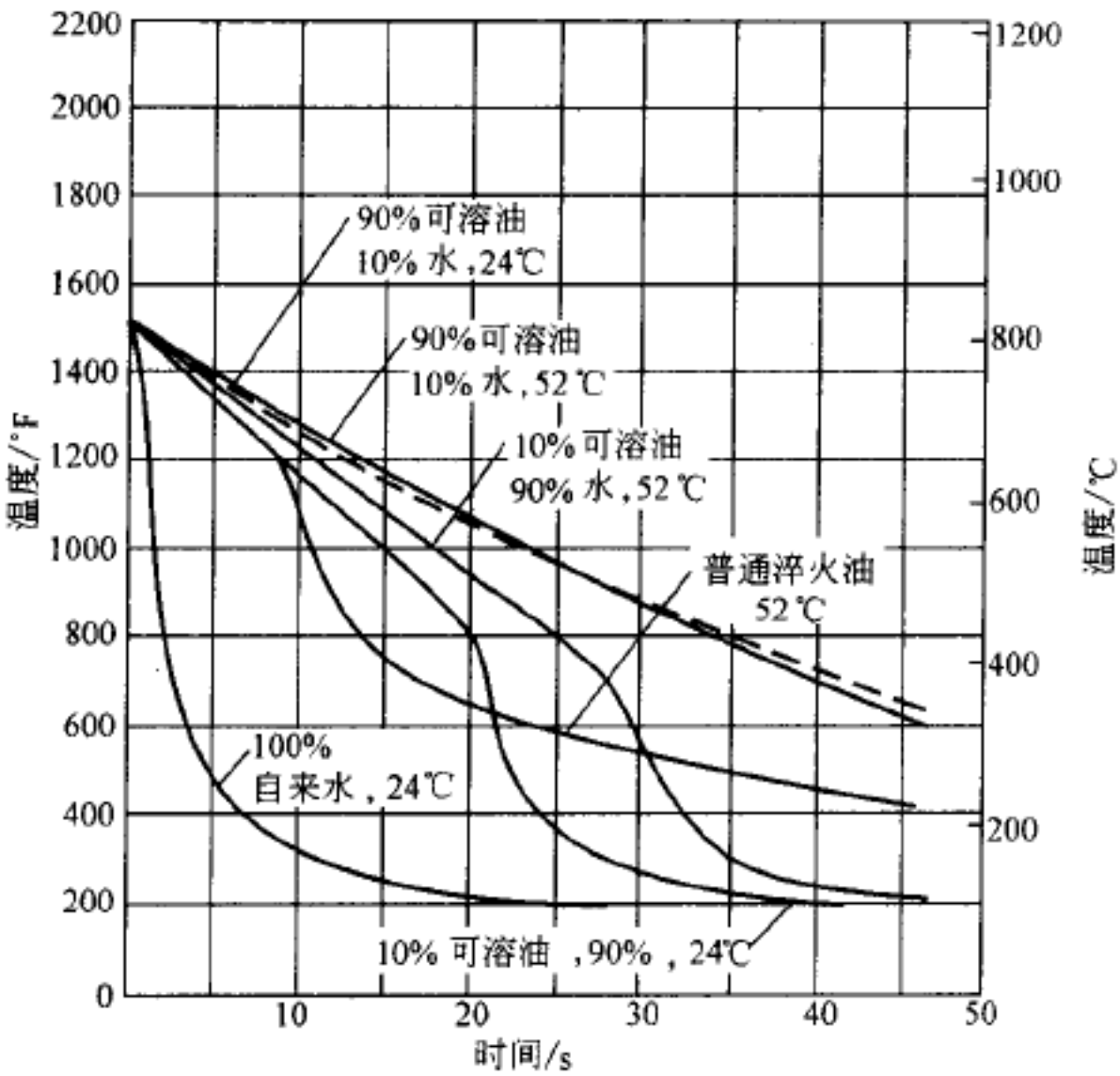


图 6-110 水，油和乳化液冷却性能比较
($\phi 12.7\text{mm} \times 63\text{mm}$ 18-8 不锈钢棒在静止液中淬冷时的心部冷却曲线)

4. 聚合物水溶液 (表 6-39 ~ 表 6-41 和图 6-111 ~ 图 6-123)

表 6-39 聚乙烯醇 (PVA) 合成淬火剂成分

组 成	含量 (质量分数) (%)	组 成	含量 (质量分数) (%)
聚乙烯醇 聚合度 1750	10	苯甲酸钠 (防腐剂)	0.2
醇解度 88%		太古油 (消泡剂)	0.02
三乙醇胺 (防锈剂)	1	水	适量

表 6-40 国产聚乙烯醇合成淬火剂浓缩液性质

项 目	性 质	项 目	性 质
外观	无色或浅黄色半透明液体	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.015 ~ 1.035
固体溶质 (质量分数) (%)	10 ~ 12	pH 值	6 ~ 8
粘度 / $\text{Pa} \cdot \text{s}$	20 ~ 50	折光率	1.3770 ~ 1.3520

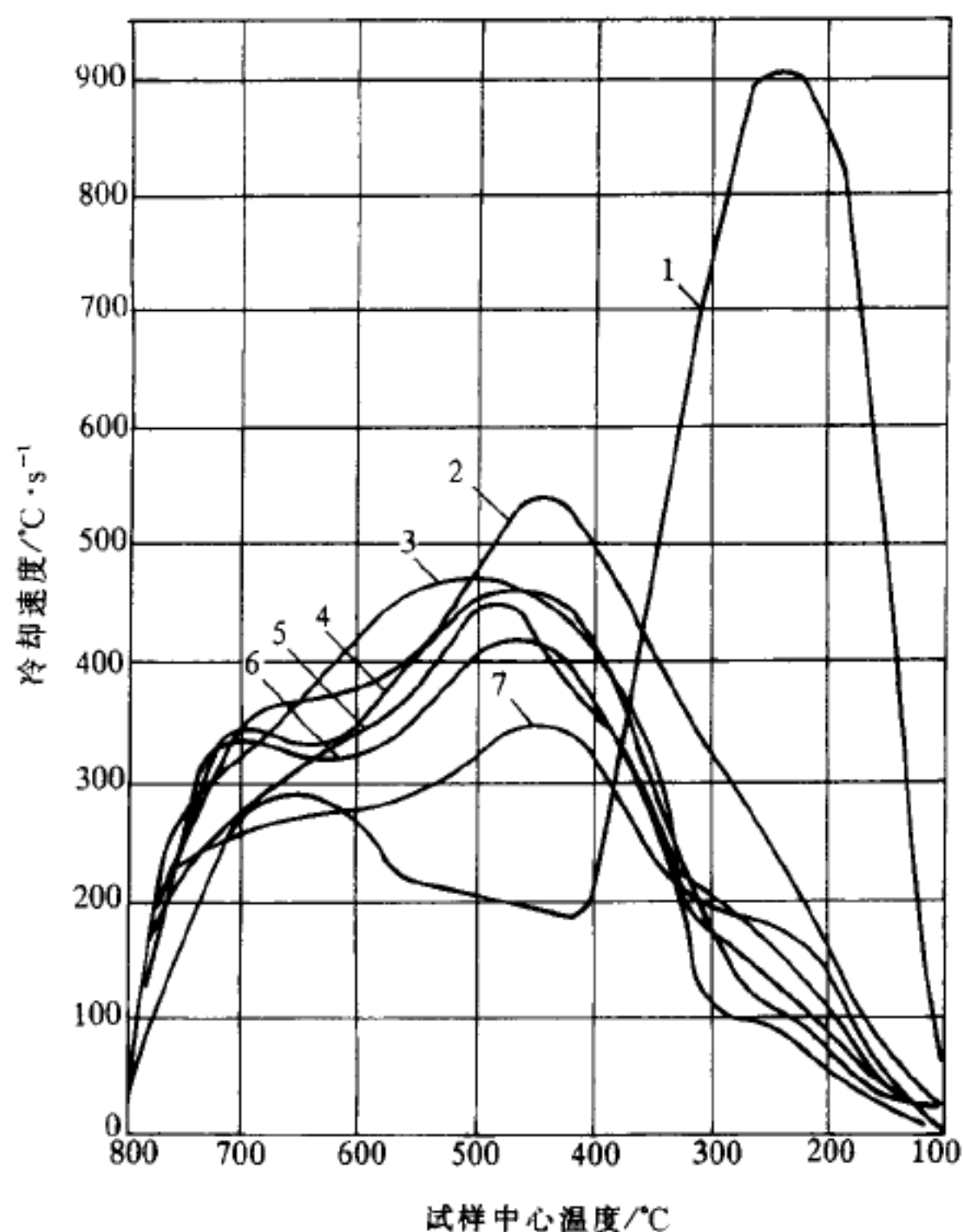


图 6-111 喷射状态下不同浓度的聚乙烯醇水溶液与水的冷却能力对比 ($\phi 20\text{mm}$ 银球)

1—水, 20°C 2—0.05% 聚乙烯醇水溶液, 26°C 3—0.5% 聚乙烯醇水溶液, 26°C 4—0.4% 聚乙烯醇溶液, 26°C 5—0.3% 聚乙烯醇水溶液, 26°C 6—0.2% 聚乙烯醇水溶液, 26°C 7—0.1% 聚乙烯醇水溶液, 26°C

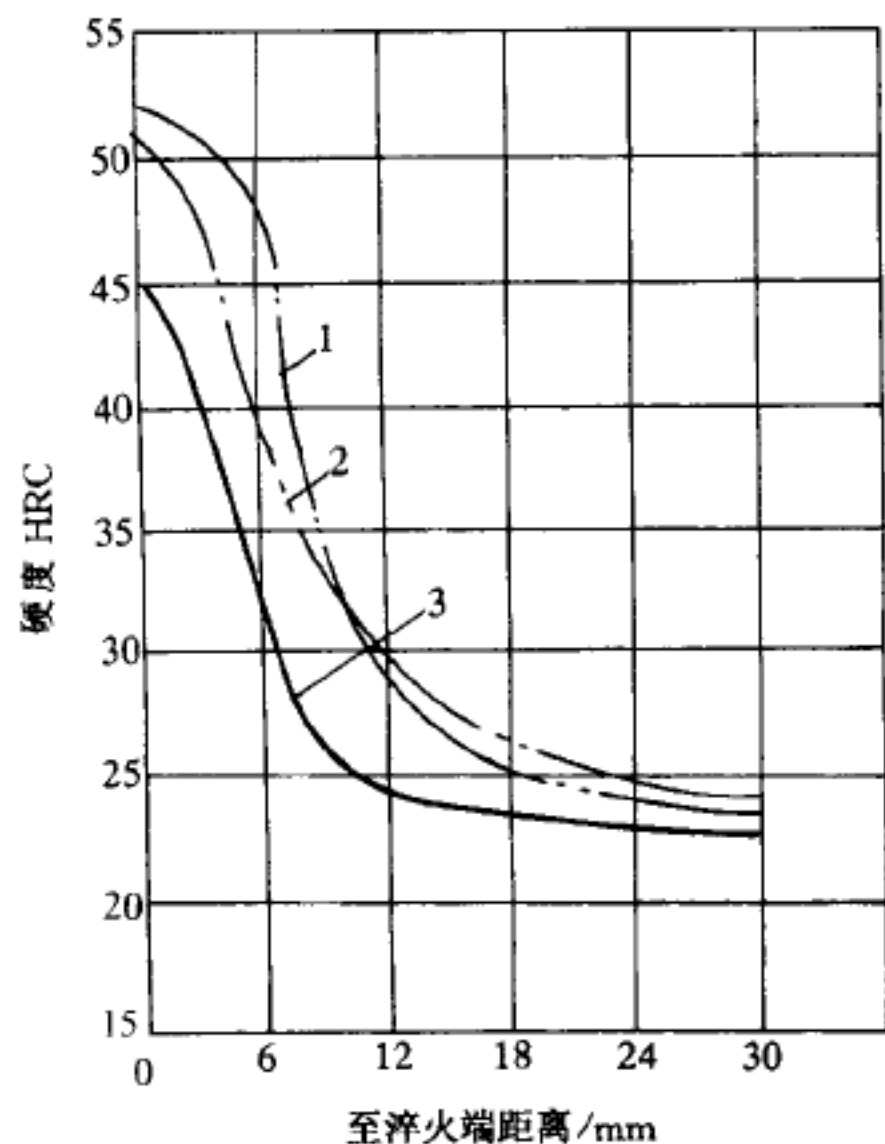


图 6-113 $\phi 25\text{mm} 40\text{MnB}$ 钢在聚乙烯醇介质中的端淬曲线
1—0.1% 2—0.2% 3—0.3%

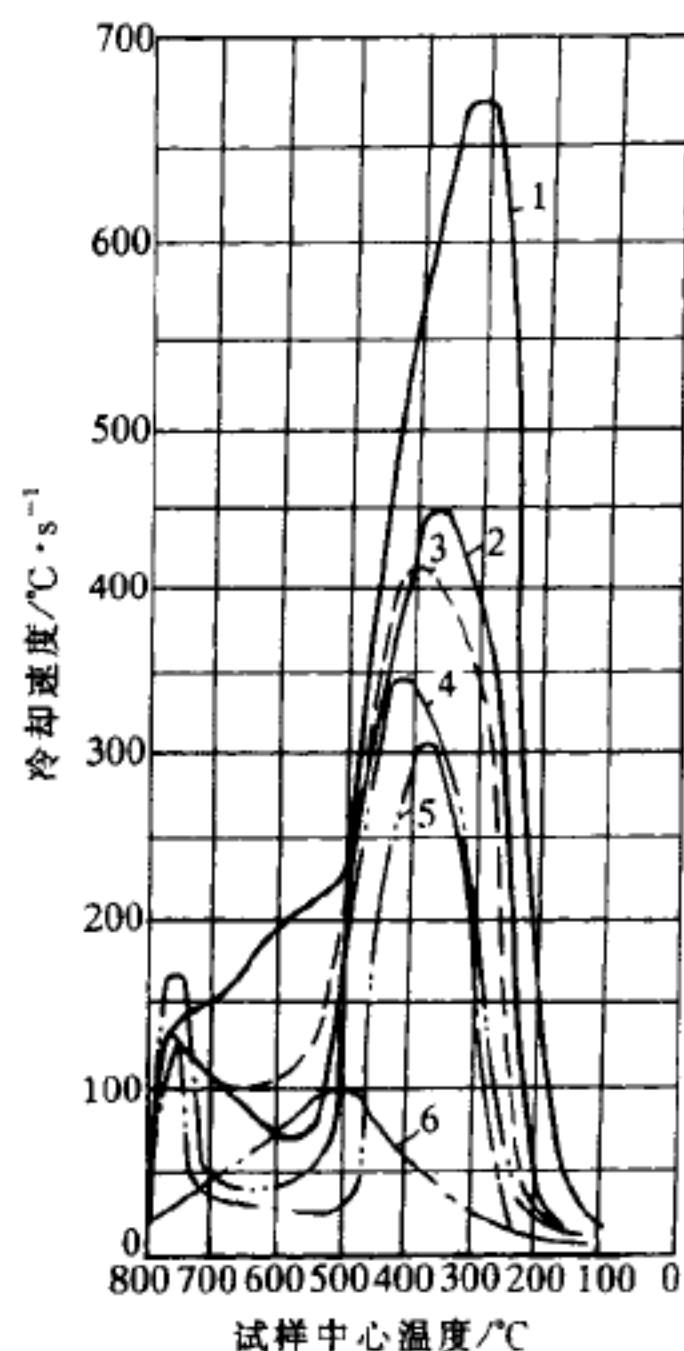


图 6-112 在静止状态下不同浓度聚乙烯醇水溶液与水的冷却能力对比 ($\phi 20\text{mm}$ 银球)

1—水, 23°C 2—0.1% 聚乙烯醇水溶液, 26°C 3—0.2% 聚乙烯醇水溶液, 26°C 4—0.3% 聚乙烯醇水溶液, 26°C 5—0.4% 聚乙烯醇水溶液, 26°C 6—3 号锭子油, 20°C

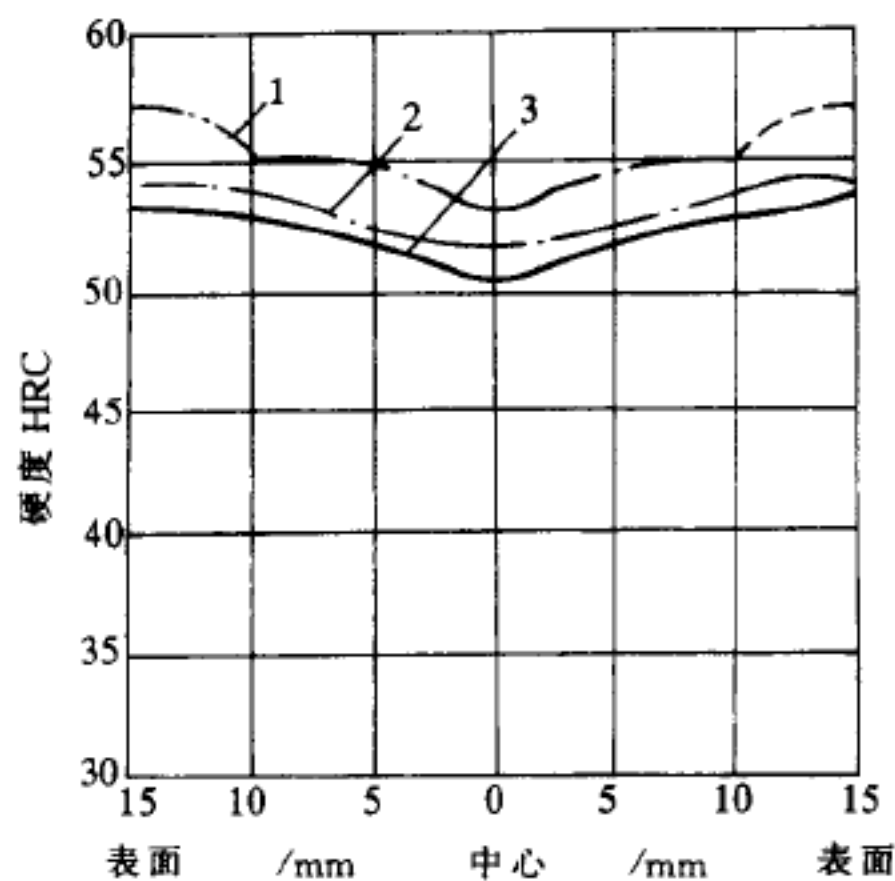


图 6-114 $\phi 30\text{mm} 40\text{MnB}$ 钢在聚乙烯醇溶液中淬火的淬透性曲线
1—0.1% 2—0.2% 3—0.3%

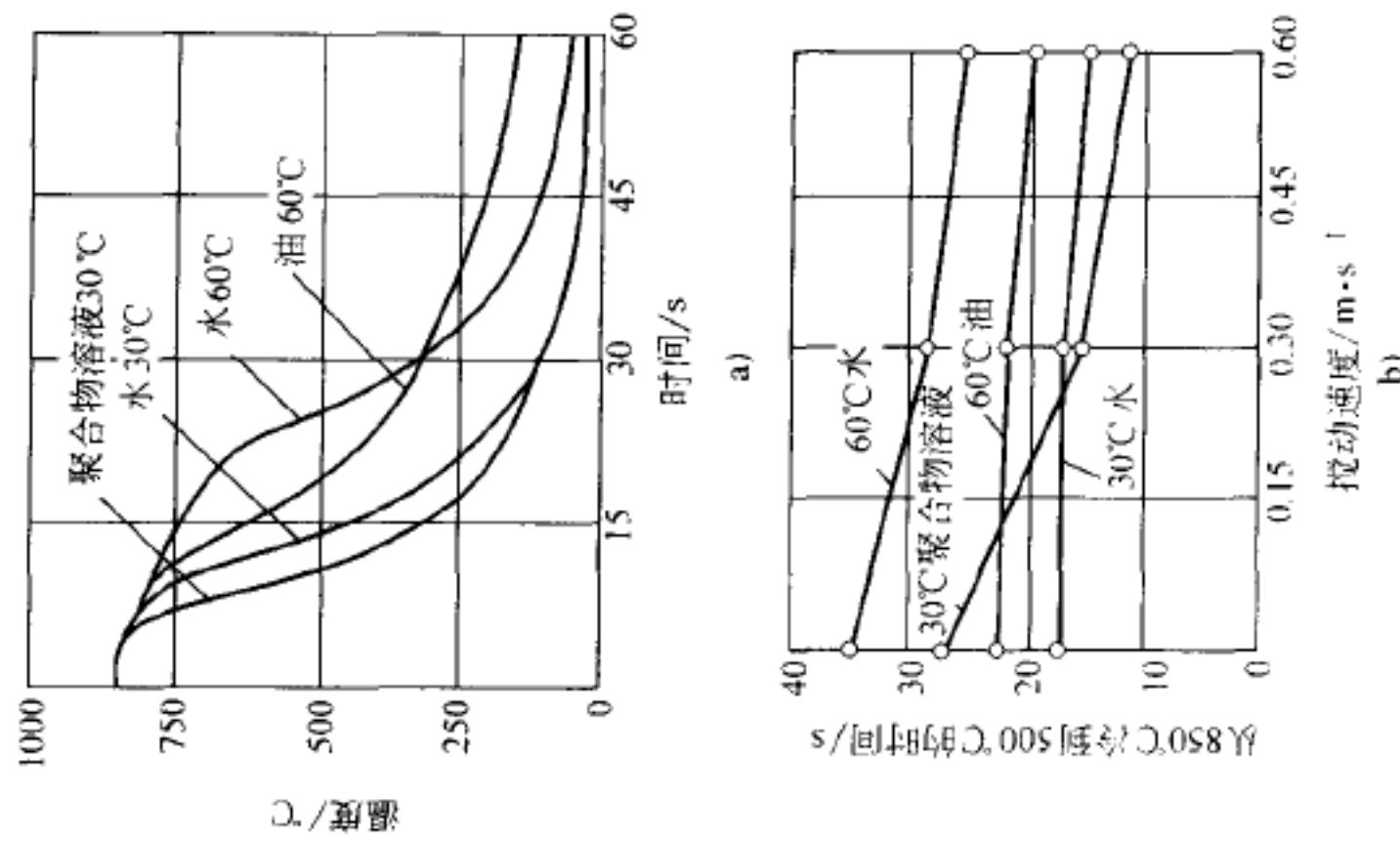


图 6-117 搅动对 $\phi 25\text{mm} \times 100\text{mm}$ 不锈钢
试棒冷却过程的影响
a) 各种淬火剂在不同温度下的冷却曲线(搅动速
率 0.6m/s) b) 各种淬火剂在不同温度下搅动
速率对从 850°C 冷到 500°C 时的影响

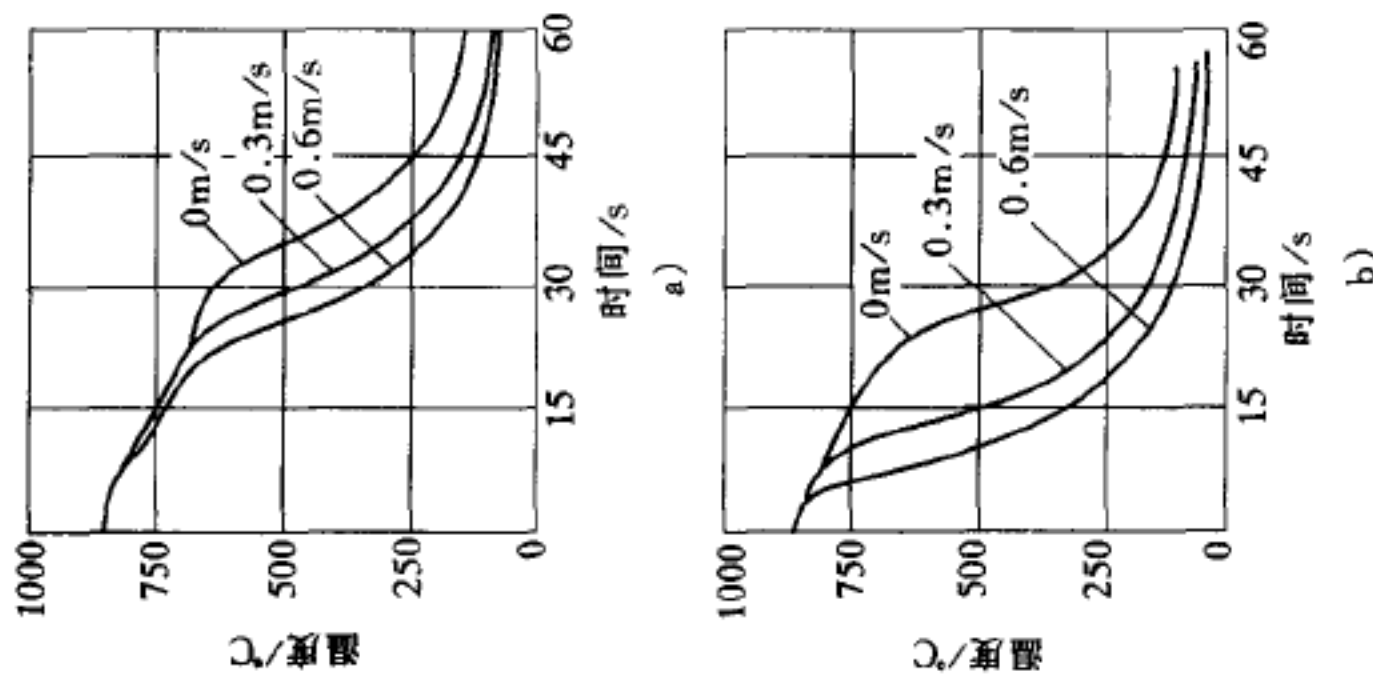


图 6-116 $\phi 25\text{mm} \times 100\text{mm}$ 奥氏体不锈钢
试样在 60°C 的水图 a) 和 10% 浓度 30°C
的聚合物水溶液中图 b) 冷却时淬火液搅
动速度对冷却曲线的影响

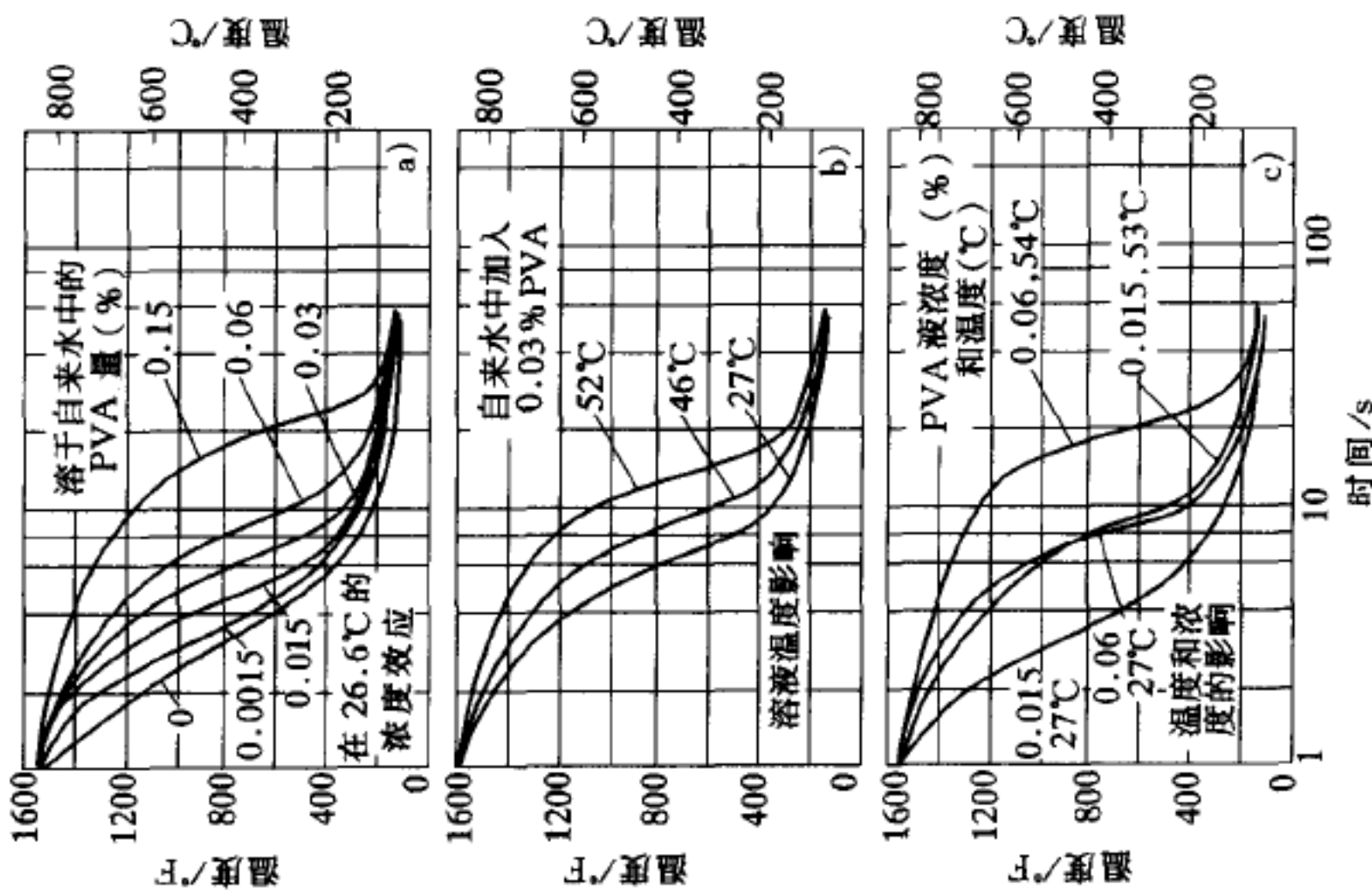


图 6-115 $\phi 12.7\text{mm} \times 101\text{mm}$ 304 不锈钢棒在
含不同浓度(质量分数)聚乙烯醇(PVA)静止自来
水中的心部冷却曲线(水硬度 130×10^{-6})

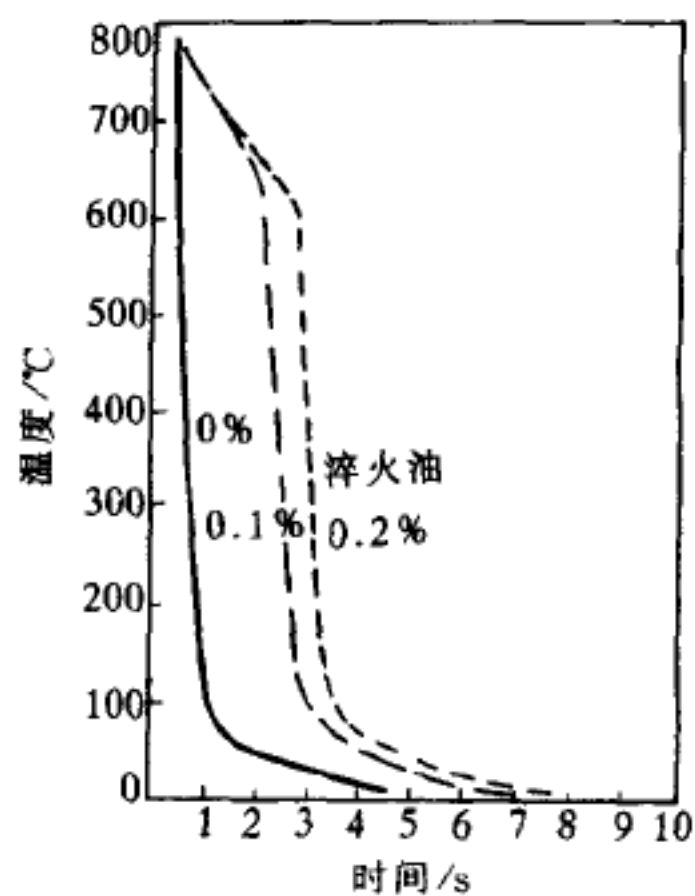


图 6-118 淬火油对聚合物水溶液冷却曲线的影响

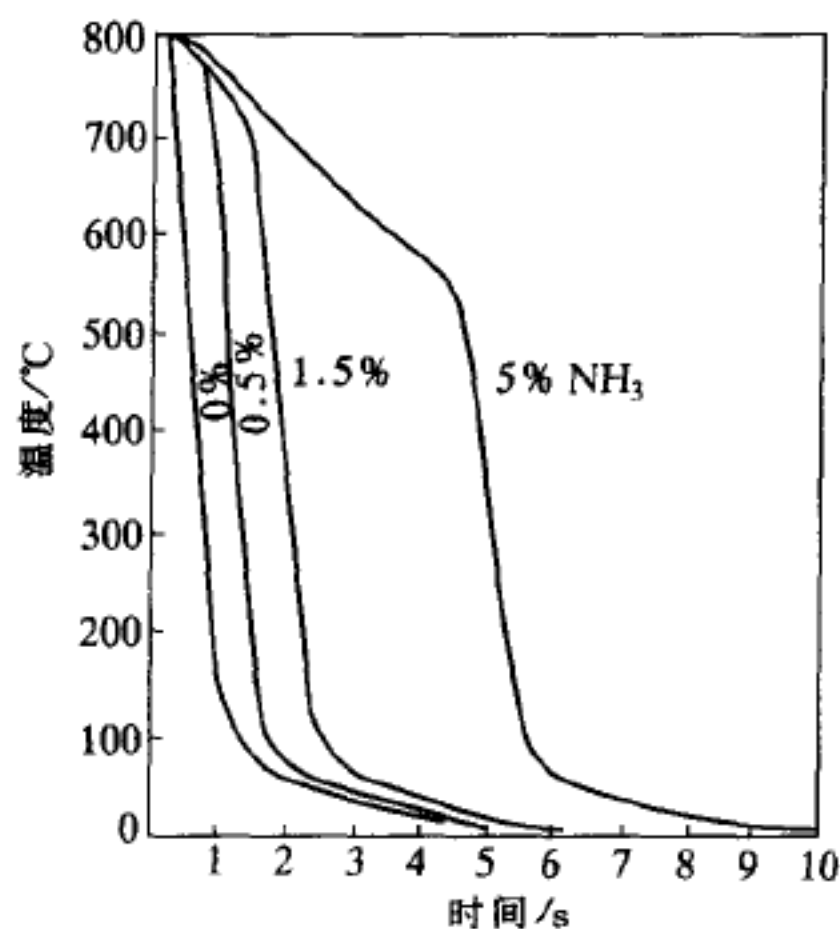


图 6-119 氨对聚合物水溶液冷却曲线的影响

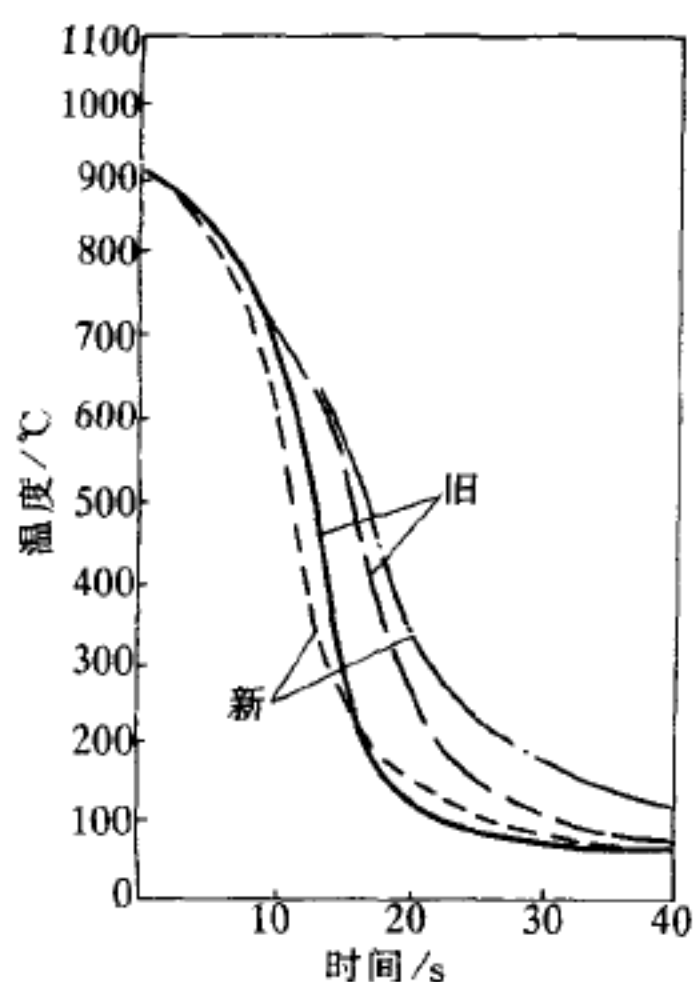


图 6-120 新旧聚乙二醇 (PAG) 淬火液的冷却曲线
($\phi 10\text{mm} \times 60\text{mm}$ AISI304 钢试棒, 液温 50°C , 流速 0.3m/s)

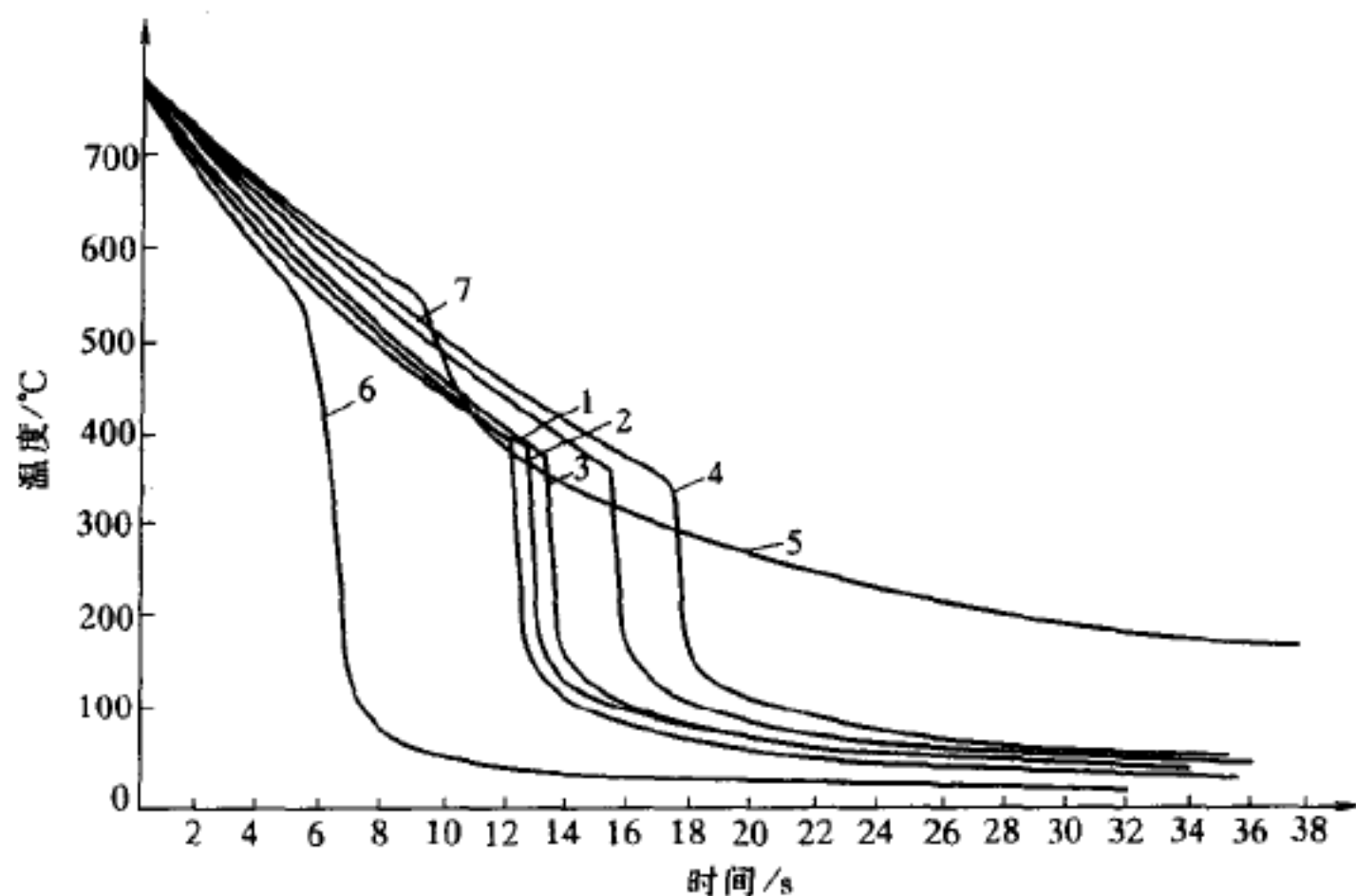


图 6-121 不同浓度 (质量分数) 的聚乙二醇 (1:1) 型水溶液及水、油在常温下的冷却曲线 ($\phi 20\text{mm}$ 银球)
1—浓度 12% 2—浓度 16% 3—浓度 20% 4—浓度 25%
5—浓度 30% 6—水 7—油

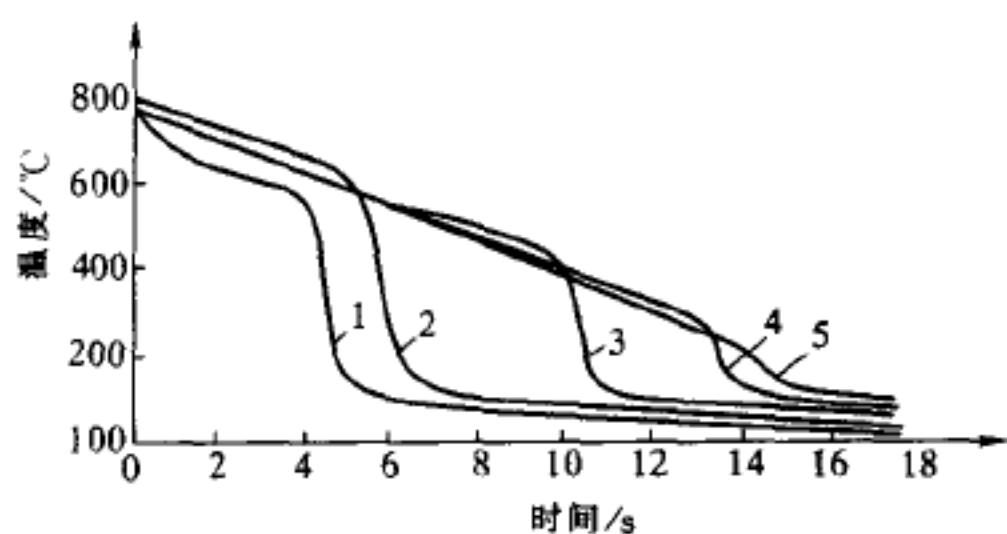


图 6-122 不同浓度 (质量分数) 聚丙烯酸钠 (PAS) 溶液冷却曲线 ($\phi 20\text{mm}$ 银球)
1—0.15% 2—0.20% 3—0.50% 4—1.5% 5—2.5%

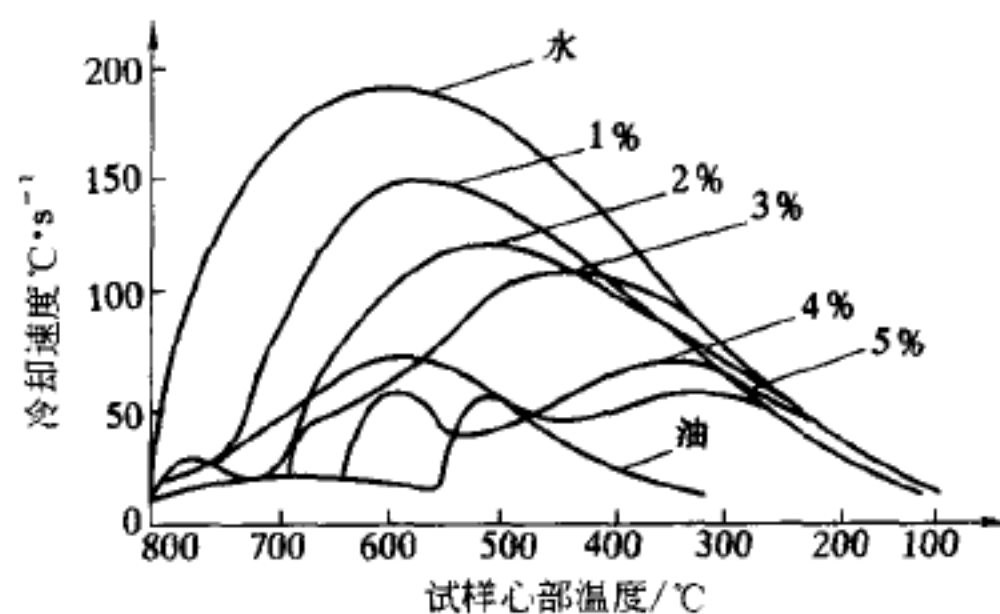


图 6-123 不同浓度高分子量聚丙烯酸钠水溶液与水、油冷却速度的比较 ($\phi 12.5\text{mm} \times 38\text{mm}$ 不锈钢棒, 测试温度 20°C)

表 6-41 20%聚烷撑二醇(PAG)溶液含盐量对冷却速度的影响

介 质	最大冷却速度 / $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$	343 $^{\circ}\text{C}$ 冷速 / $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$	介 质	最大冷却速度 / $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$	343 $^{\circ}\text{C}$ 冷速 / $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$
含 NaNO_2 (质量分数) (%)			6.0 蒸馏水	65.8 61.8	35.0 33.0
0.0	39.0	25.3			
3.0	54.0	31.8			

5. 等温盐浴 (表 6-42、表 6-43 和图 6-124 ~ 图 6-130)

表 6-42 等温盐浴成分和工作温度

成分(质量 分数)(%)	混 合 盐			
	1	2	3	4
NaNO_3	45 ~ 55	15 ~ 25	57	—
NaNO_2	—	23 ~ 55	43	53
KNO_3	45 ~ 55	45 ~ 55	—	47
工作温度/ $^{\circ}\text{C}$	260 ~ 595	175 ~ 590	230 ~ 550	160 ~ 550

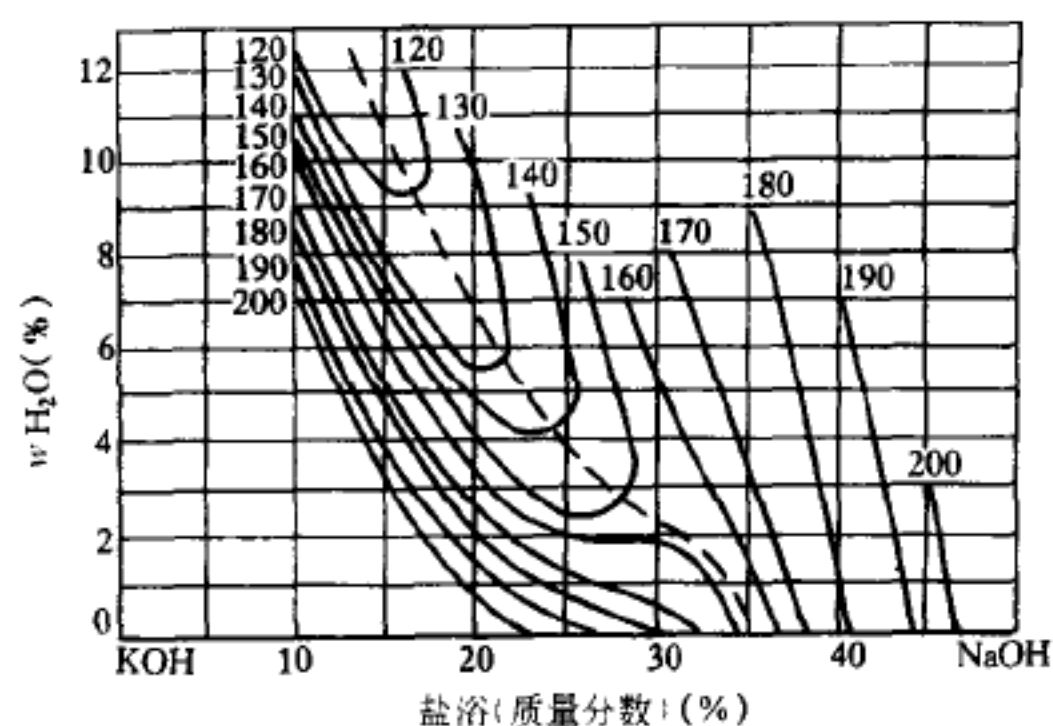
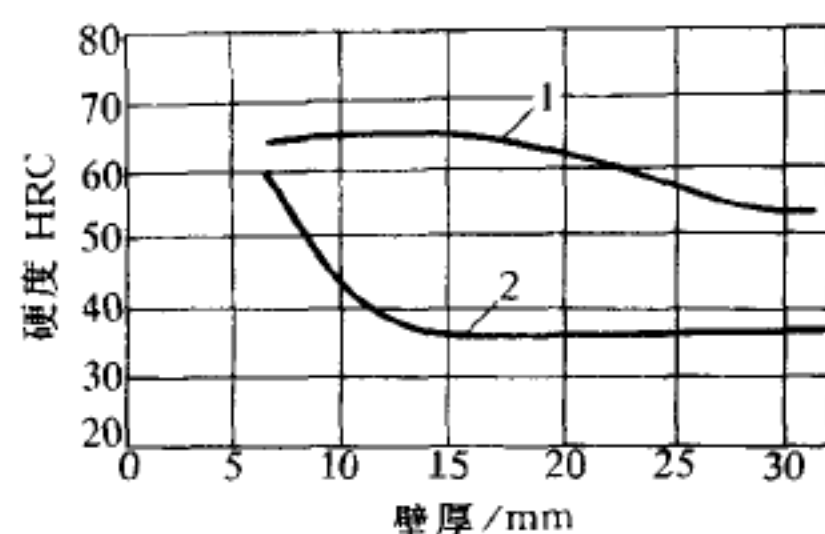
图 6-124 NaOH-KOH-H₂O 的
熔化等温曲线

图 6-126 搅动对 52100 钢 (GCr15) 在热盐浴
中分级淬火时的表面硬度的影响
1—强烈搅动 2—不搅动

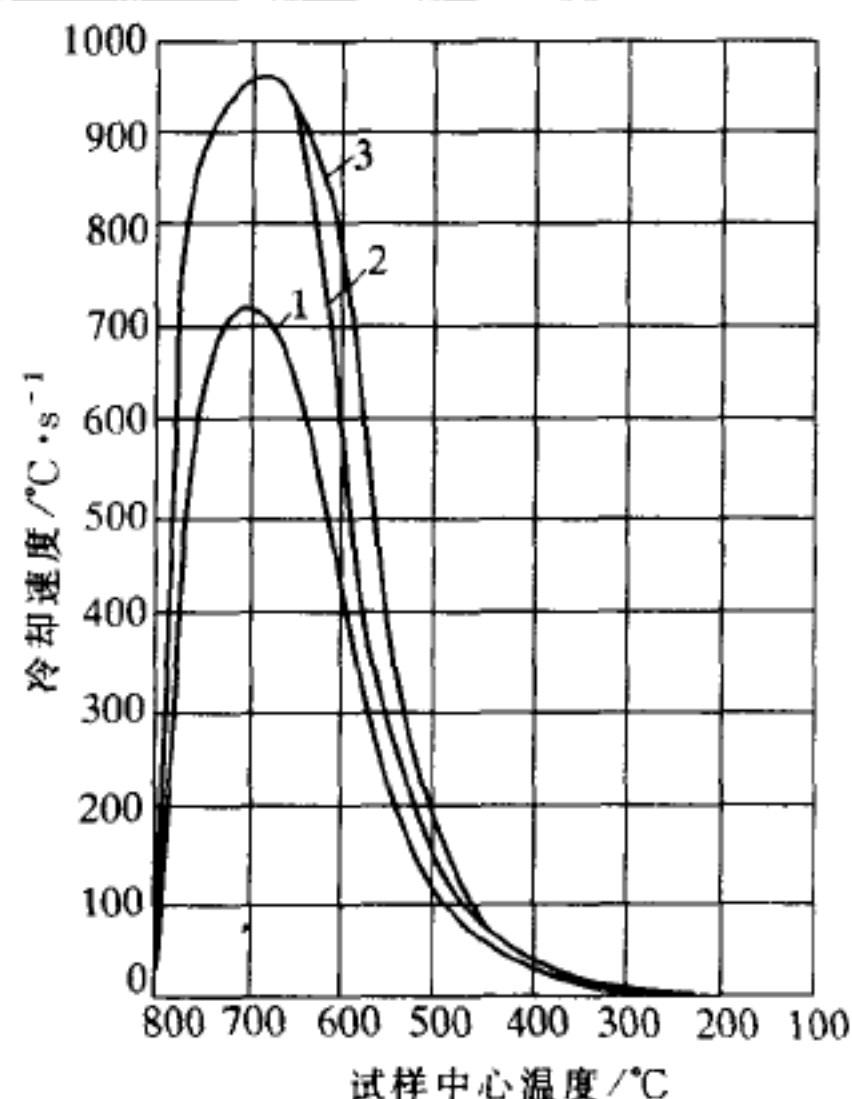


图 6-125 不同成分碱浴(质量分数)的冷却曲线
1—85% KOH + 15% NaNO_2 , 另加 3% H_2O , 170 $^{\circ}\text{C}$
2—85% KOH + 15% NaNO_2 , 另加 3% H_2O , 170 $^{\circ}\text{C}$
3—80% KOH + 20% NaOH, 另加 3% KNO_3 + 3%
 NaNO_2 + 6% H_2O , 170 $^{\circ}\text{C}$

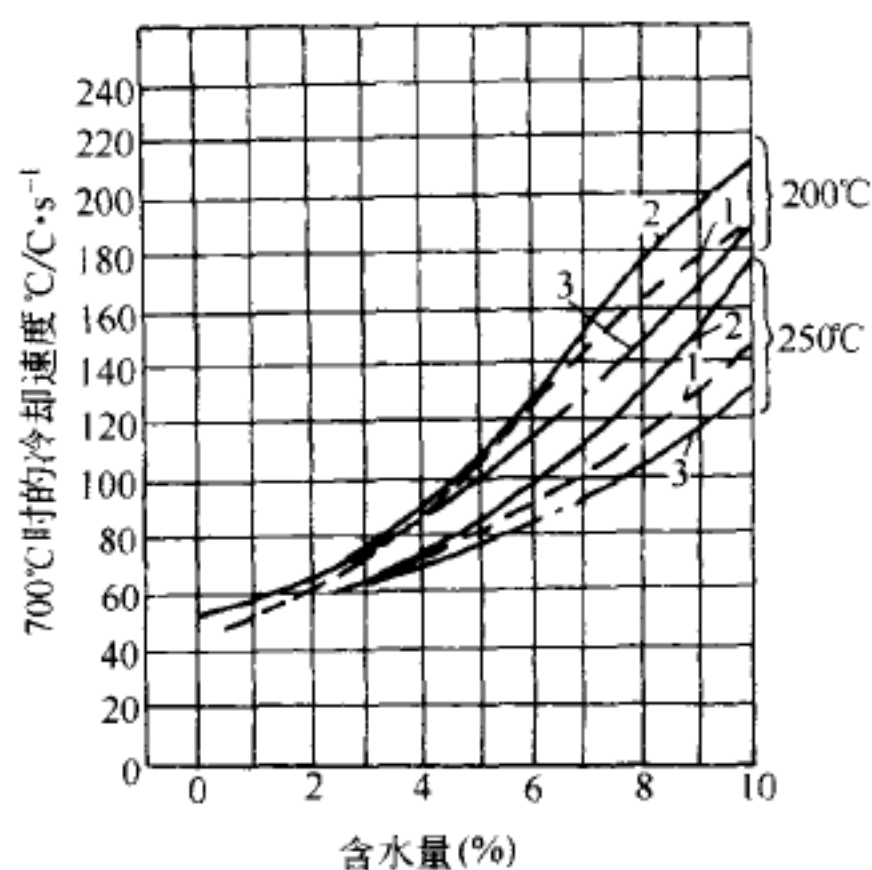


图 6-127 苛性碱溶液的淬火能力〔在 700 $^{\circ}\text{C}$
时直径 25mm 的圆柱形钢样表面冷却速度与
其中含水量(质量分数)的关系〕
1—20% NaOH + 80% KOH 2—30% NaOH + 70% KOH
3—40% NaOH + 60% KOH 淬火介质的温度 200 $^{\circ}\text{C}$ 和 250 $^{\circ}\text{C}$

表 6-43 $\text{KNO}_3 + \text{NaNO}_2$ 等温盐浴 (熔点 135°C)
的工作温度对淬火烈度 H 值的影响

工作温度/ $^\circ\text{C}$	Grossmann 淬火烈度 H	工作温度/ $^\circ\text{C}$	Grossmann 淬火烈度 H
195	0.40	270	0.45
200	0.45	295	0.41
230	0.40	350	0.43

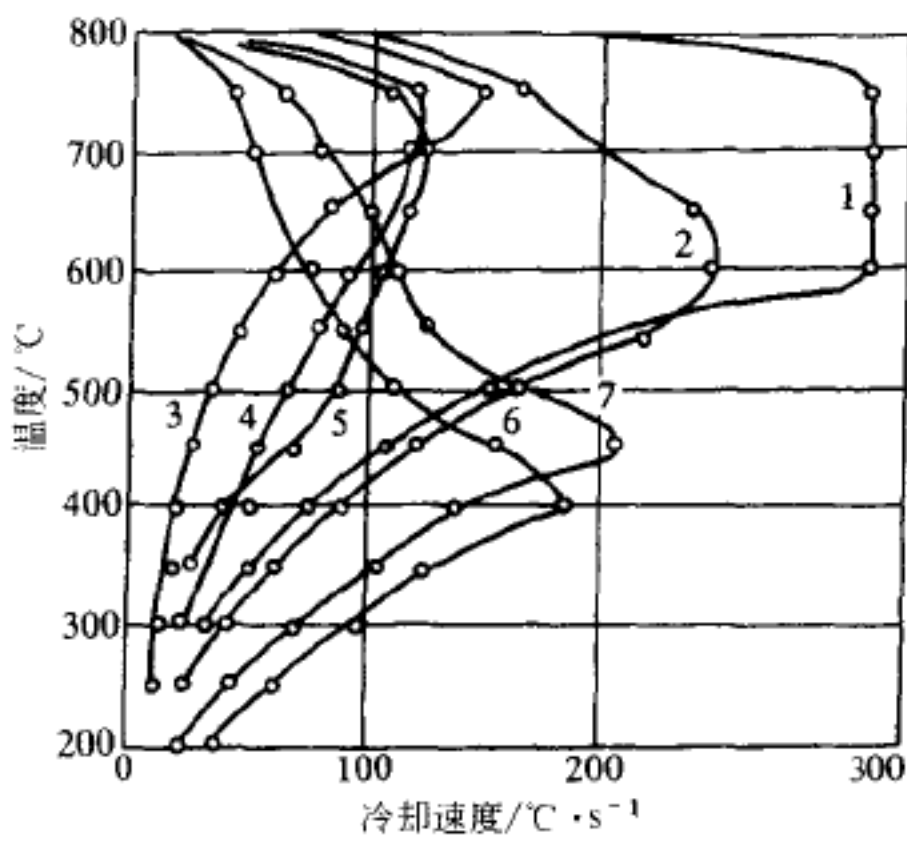


图 6-128 $\phi 20\text{mm}$ 银球在 $55\% \text{KNO}_3 + 45\% \text{NaNO}_2$ 盐浴中冷却速度的变化与水含量 (质量分数) 的关系 (浴温 170°C)
1— $0.68\% \text{H}_2\text{O}$ 2— $0.93\% \text{H}_2\text{O}$ 3— $0\% \text{H}_2\text{O}$
4— $0\% \text{H}_2\text{O}$ 通压缩空气 5— 50°C 油 6— $3.93\% \text{H}_2\text{O}$ 通压缩空气 7— $4.26\% \text{H}_2\text{O}$

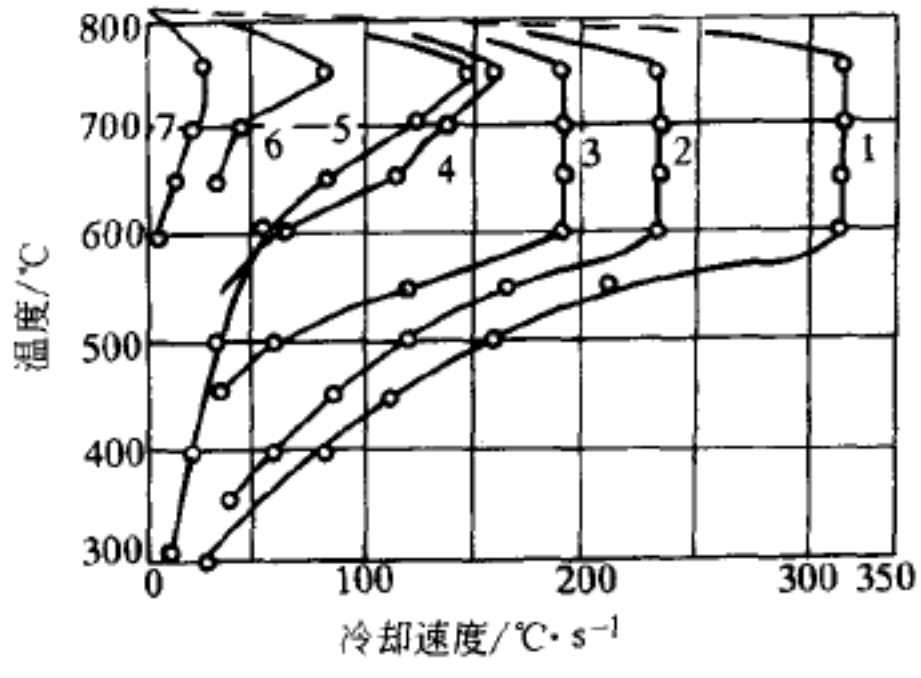


图 6-129 $\phi 20\text{mm}$ 银球冷却速度特性与 $55\% \text{KNO}_3 + 45\% \text{NaNO}_2$ 盐浴温度的关系 (含量均质量分数)
1— 170°C , $0.68\% \text{H}_2\text{O}$ 2— 210°C , $1.04\% \text{H}_2\text{O}$
3— 320°C , $0.28\% \text{H}_2\text{O}$ 4— 440°C , $0.16\% \text{H}_2\text{O}$
5— 500°C , $0.12\% \text{H}_2\text{O}$ 6— 270°C , 无水
7— 520°C , 无水

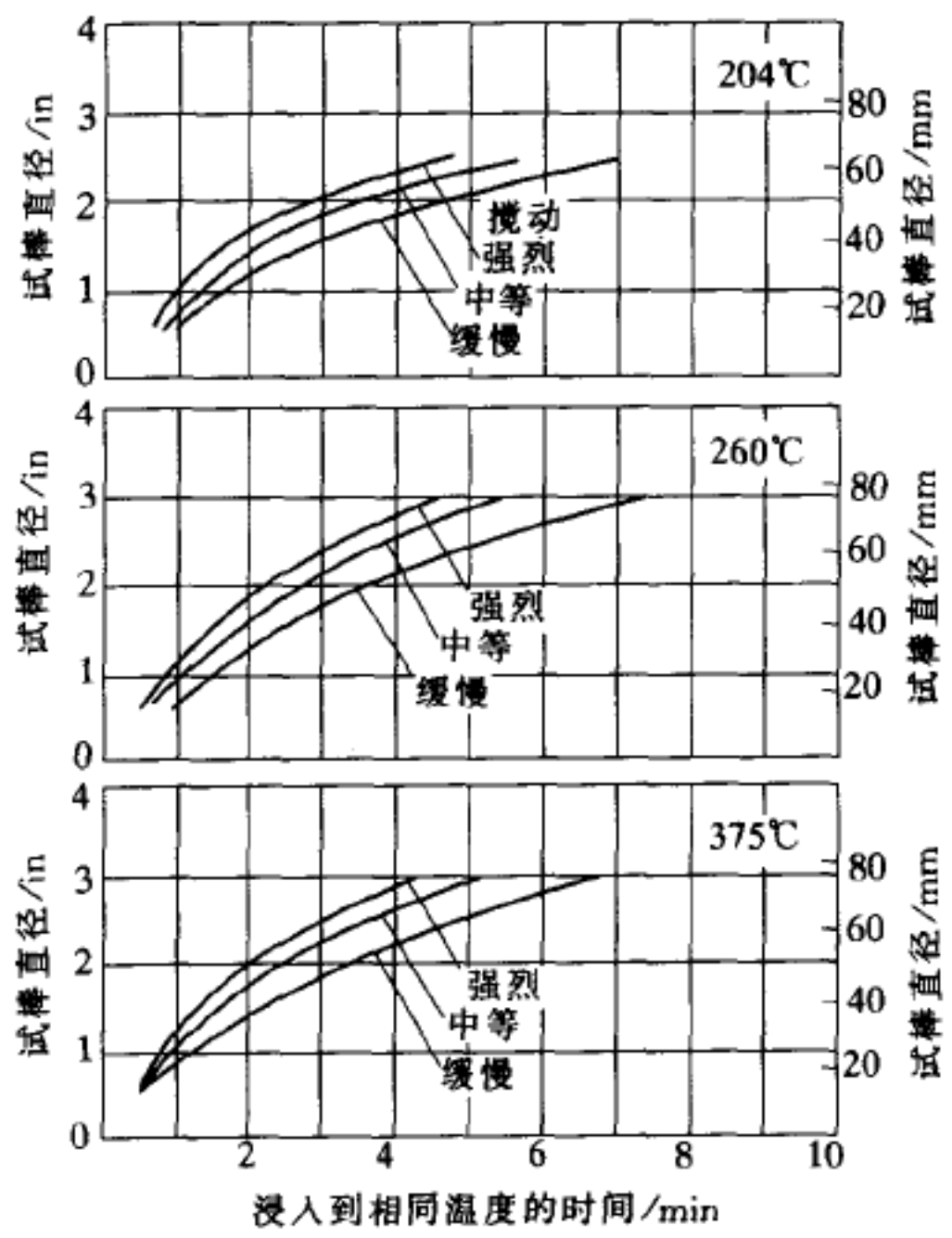


图 6-130 1045 钢从 843°C 淬入 204°C , 260°C , 375°C 硝盐浴中时试棒尺寸和搅动对心部冷却过程的影响 (试棒长度为直径的 3 倍)

6. 流态床 (表 6-44 和图 6-131 ~ 图 6-137)

表 6-44 流态床变量及其对热传导性的影响

参 数	效 果	说 明
粒子尺寸 d	$d \uparrow, \downarrow$	$d > d_{\text{crit}}$ 时成立
体积热容 c_v	$c_v \uparrow, \uparrow$	Al_2O_3
气体热导率 K	$K \uparrow, \uparrow$	He, H_2

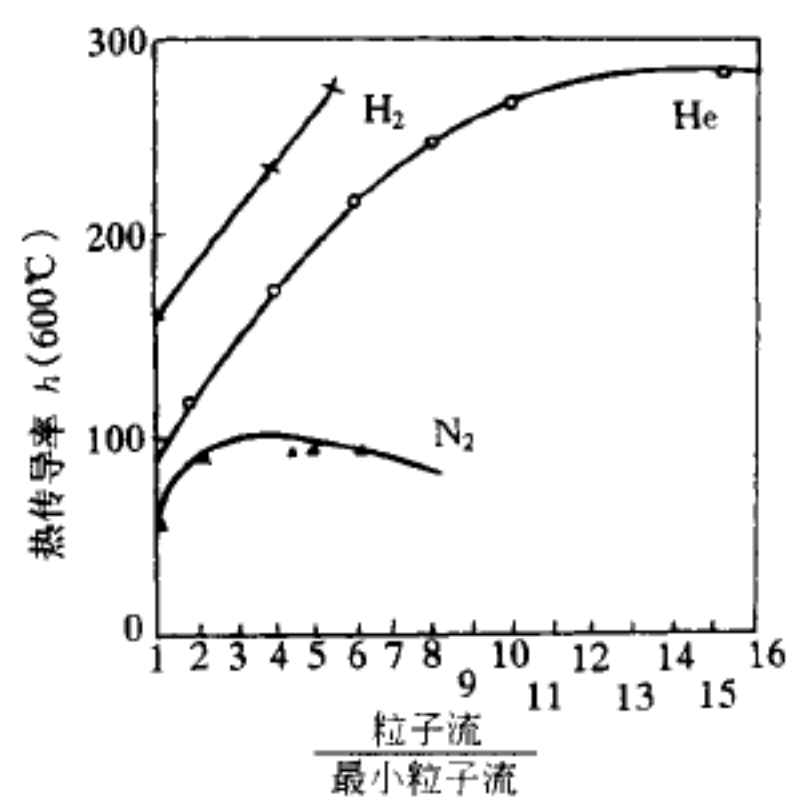


图 6-131 流动粒子炉中的气体对传热性质的影响

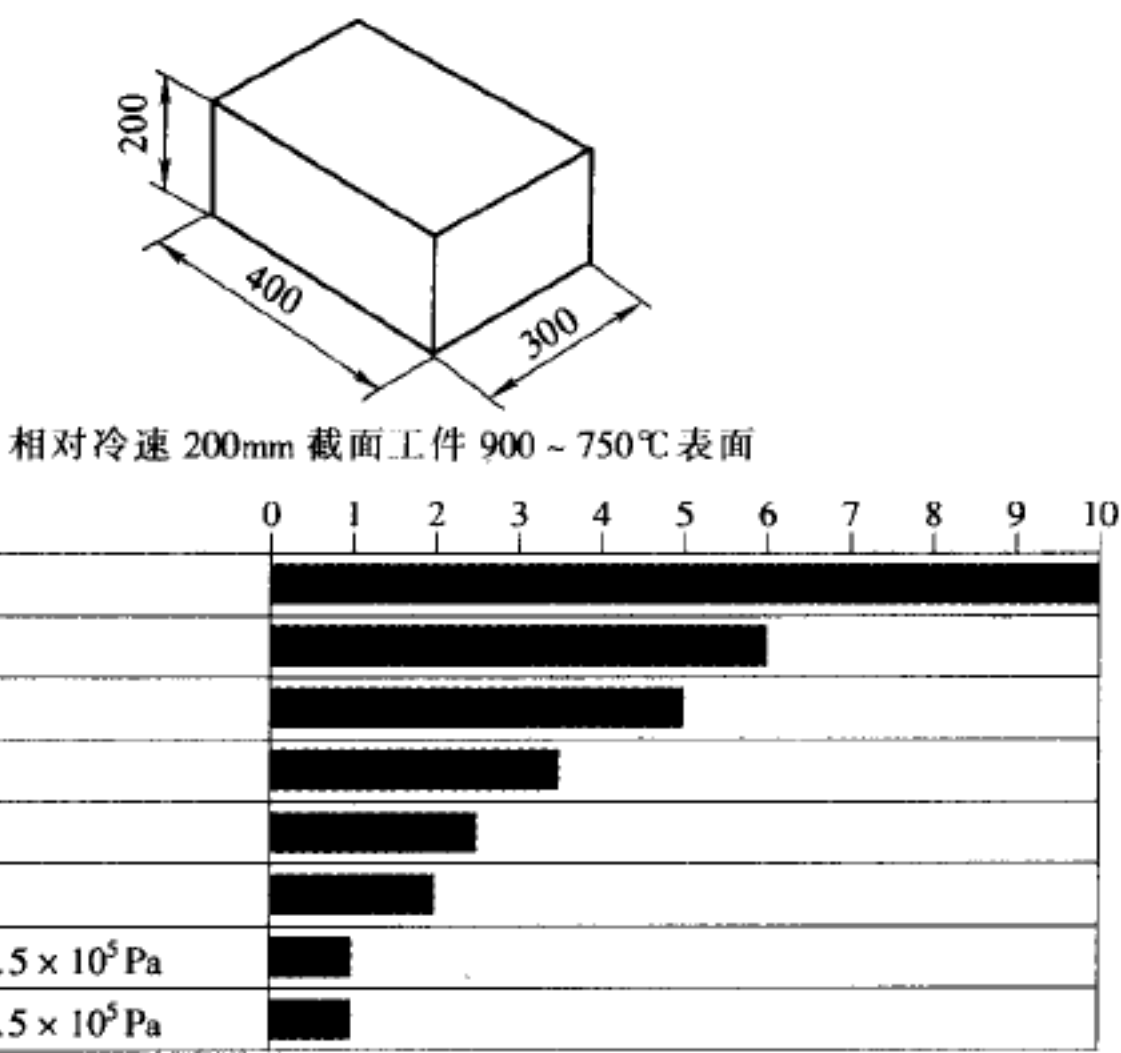


图 6-132 各种淬火介质冷却速度比较

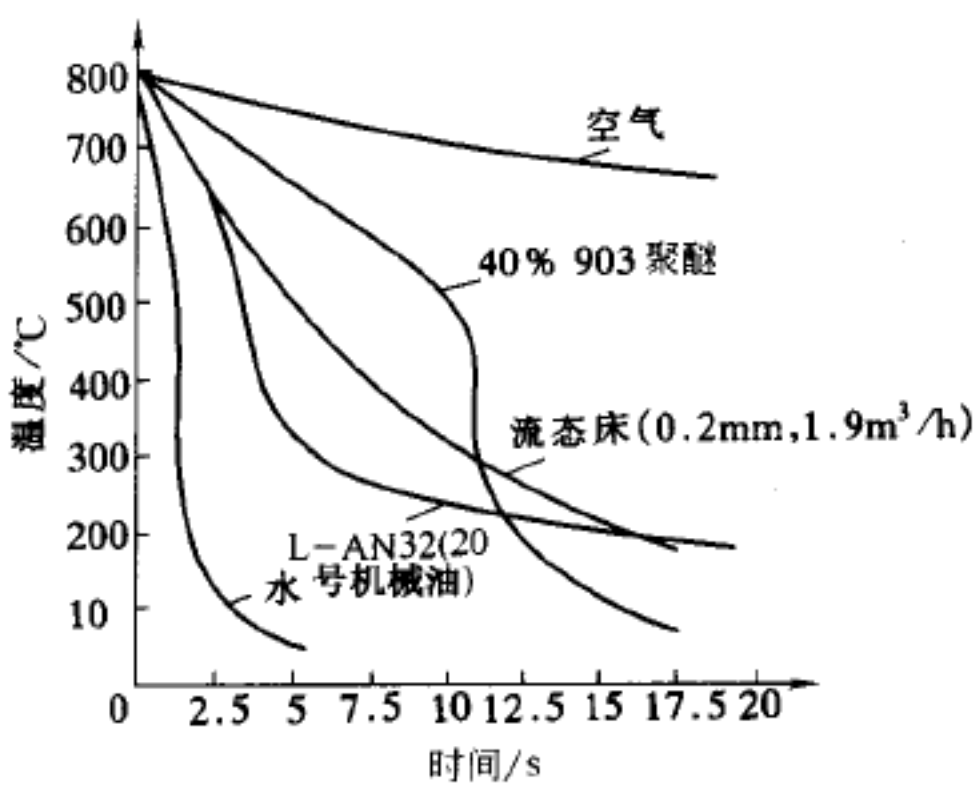


图 6-133 几种常用介质的冷却曲线

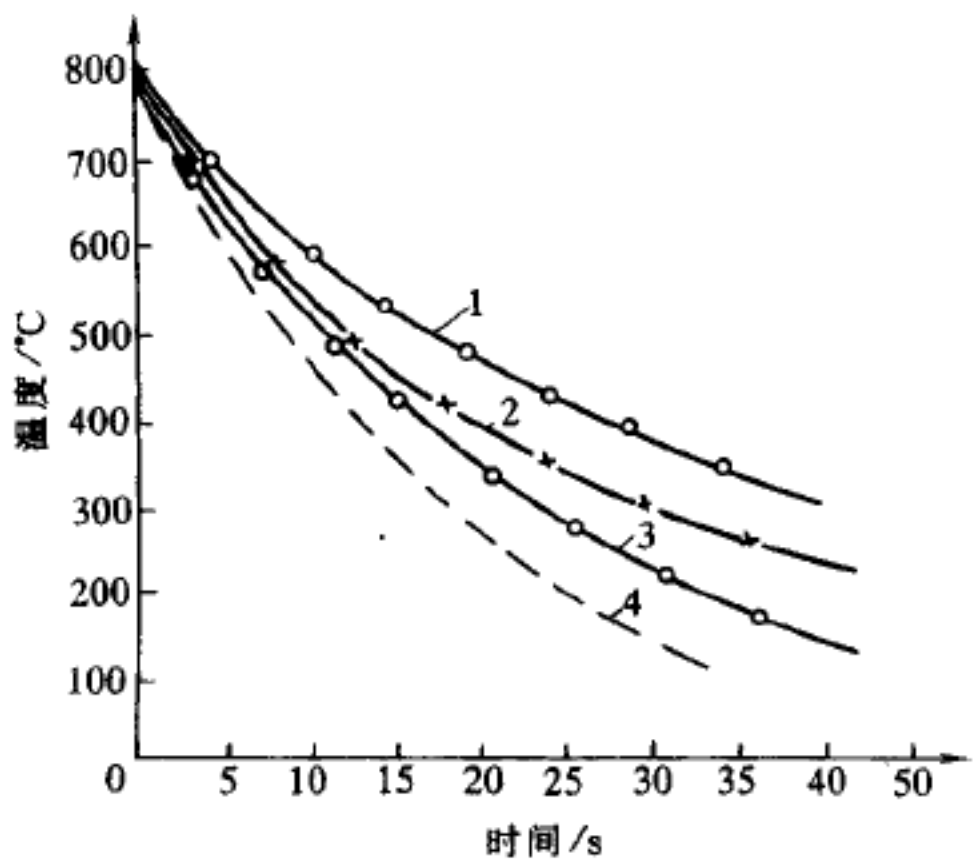


图 6-134 几种流态床的冷却曲线
1—渗硼颗粒 2—氧化铝 3—石墨 4—刚玉砂
粒径 0.375mm 风量 0.6m³/h

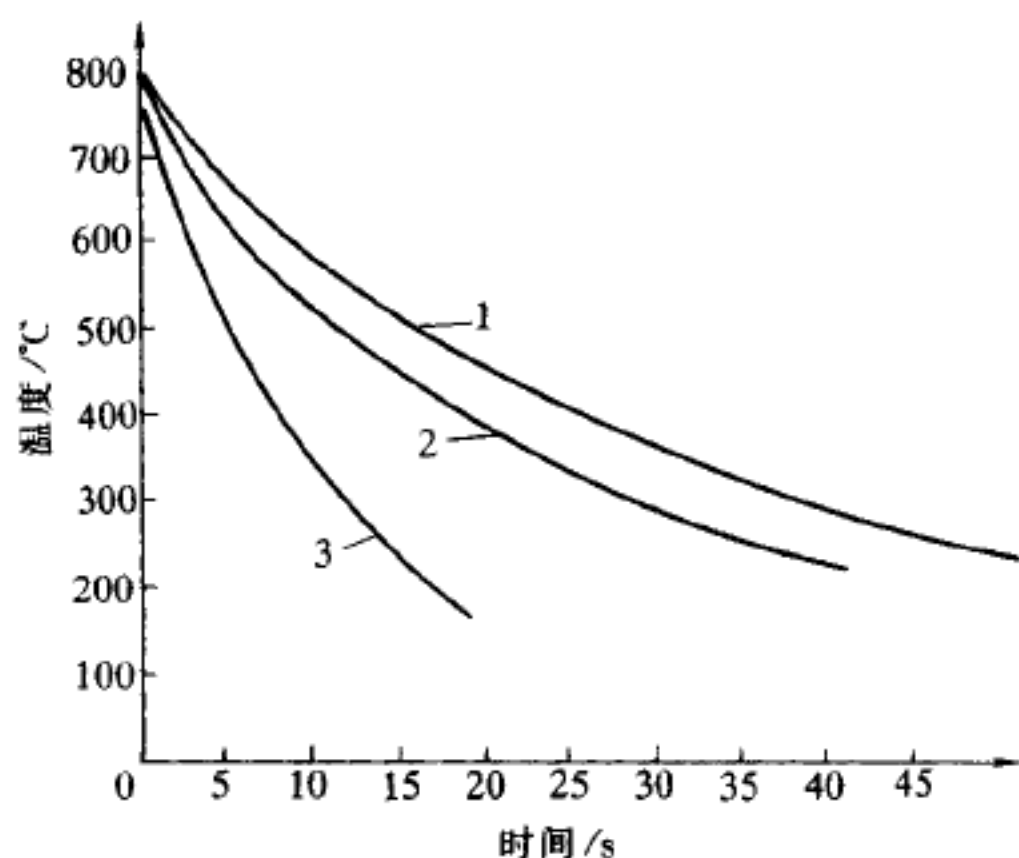


图 6-135 粒径对流体床冷却能力的影响

1—0.6mm 2—0.375mm 3—0.20mm
风量 $2.0\text{m}^3/\text{h}$

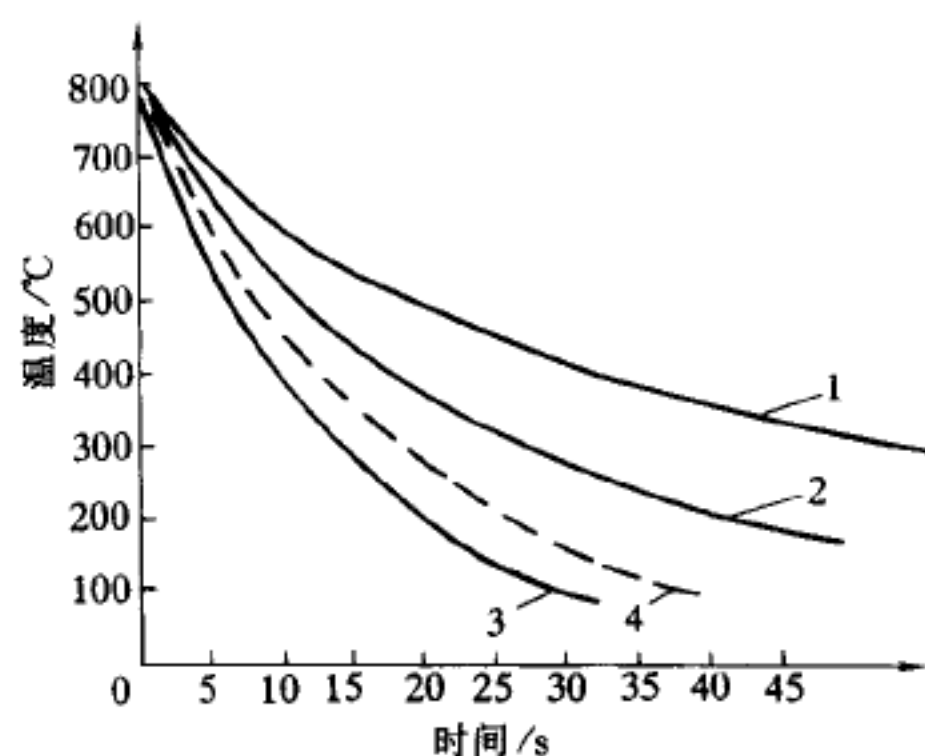


图 6-136 风量对冷却能力的影响

1— $1.1\text{m}^3/\text{h}$ 2— $1.5\text{m}^3/\text{h}$ 3— $2.0\text{m}^3/\text{h}$
4— $2.3\text{m}^3/\text{h}$ 粒径 0.2mm

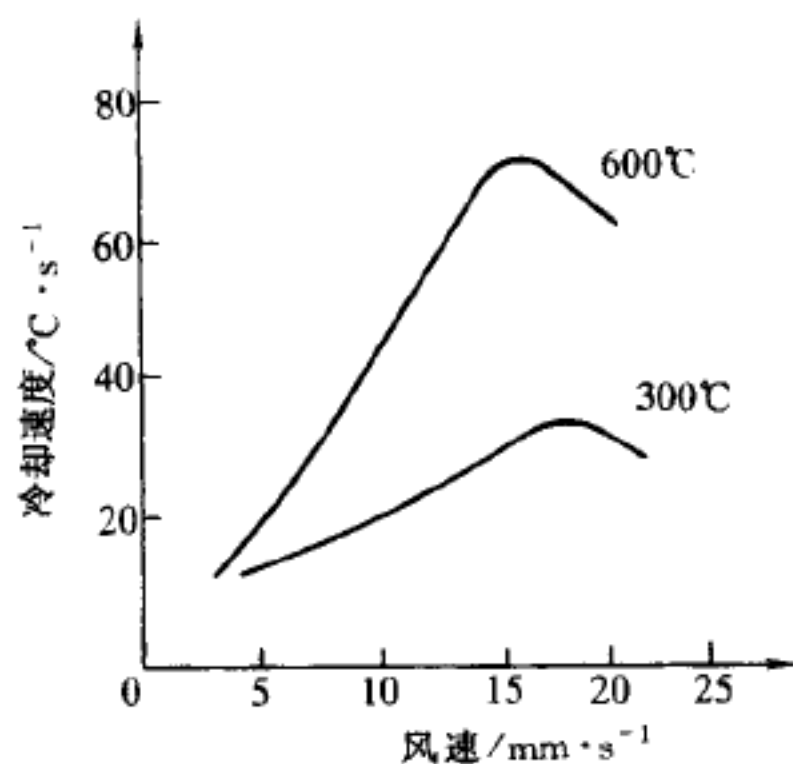


图 6-137 不同风速流体床的冷却能力

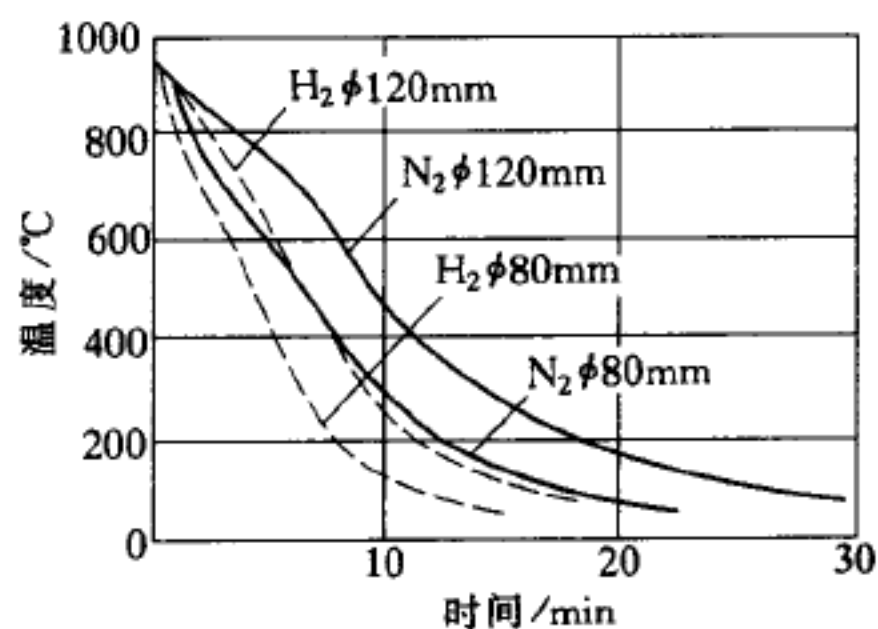
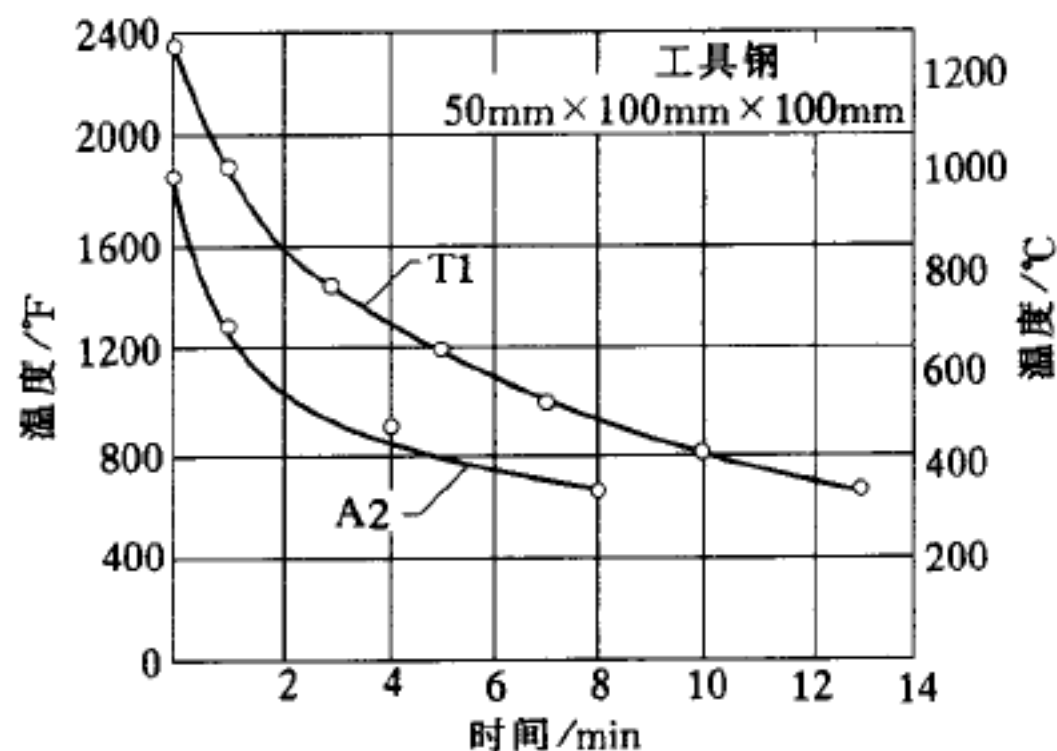


图 6-138 DIN1.2080 钢冷却时间/min (相当 Cr12)

$\phi 80\text{mm} \times 200\text{mm}$ 、 $\phi 120\text{mm} \times 200\text{mm}$ 棒料

在 $5 \times 10^5\text{Pa}$ 压强的 H_2 、 N_2 气氛中的冷却曲线

7. 金属在气体中的冷却 (图 6-138 ~ 图 6-143 和表 6-45)

图 6-139 T1 ($w_c \approx 0.7\%$, $w_{Cr} \approx 4.0\%$) 和 A2

($w_c 1.0\%$ $w_{Cr} \approx 5\%$, $w_{Mn} \approx 1.0\%$, $w_V \approx 0.4\%$)

工具钢真空加热奥氏体化后在 70kPa

氮气中的表面冷却曲线

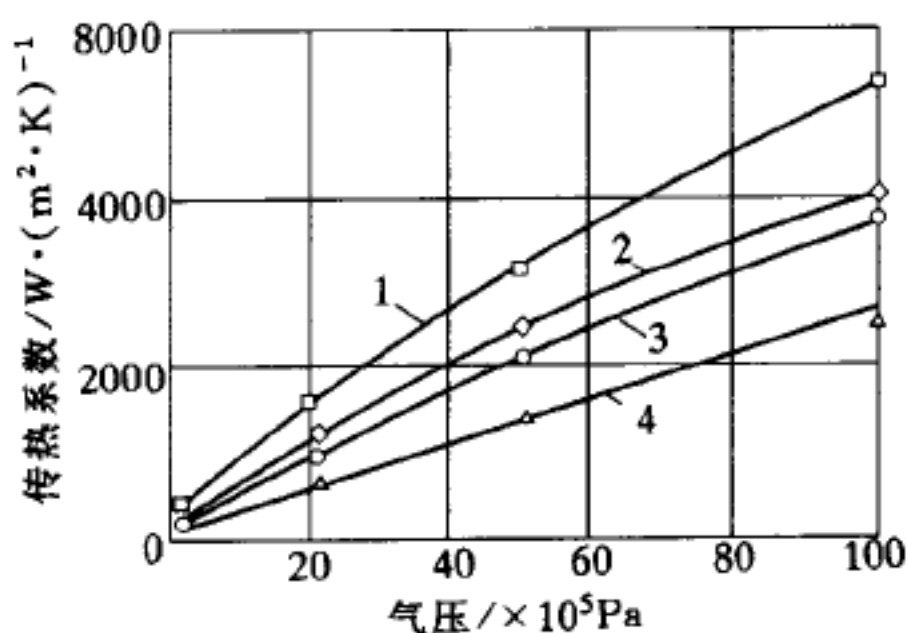


图 6-140 惰性气体传热系数和气压的关系

1— H_2 2— He 3— N_2 4— Ar

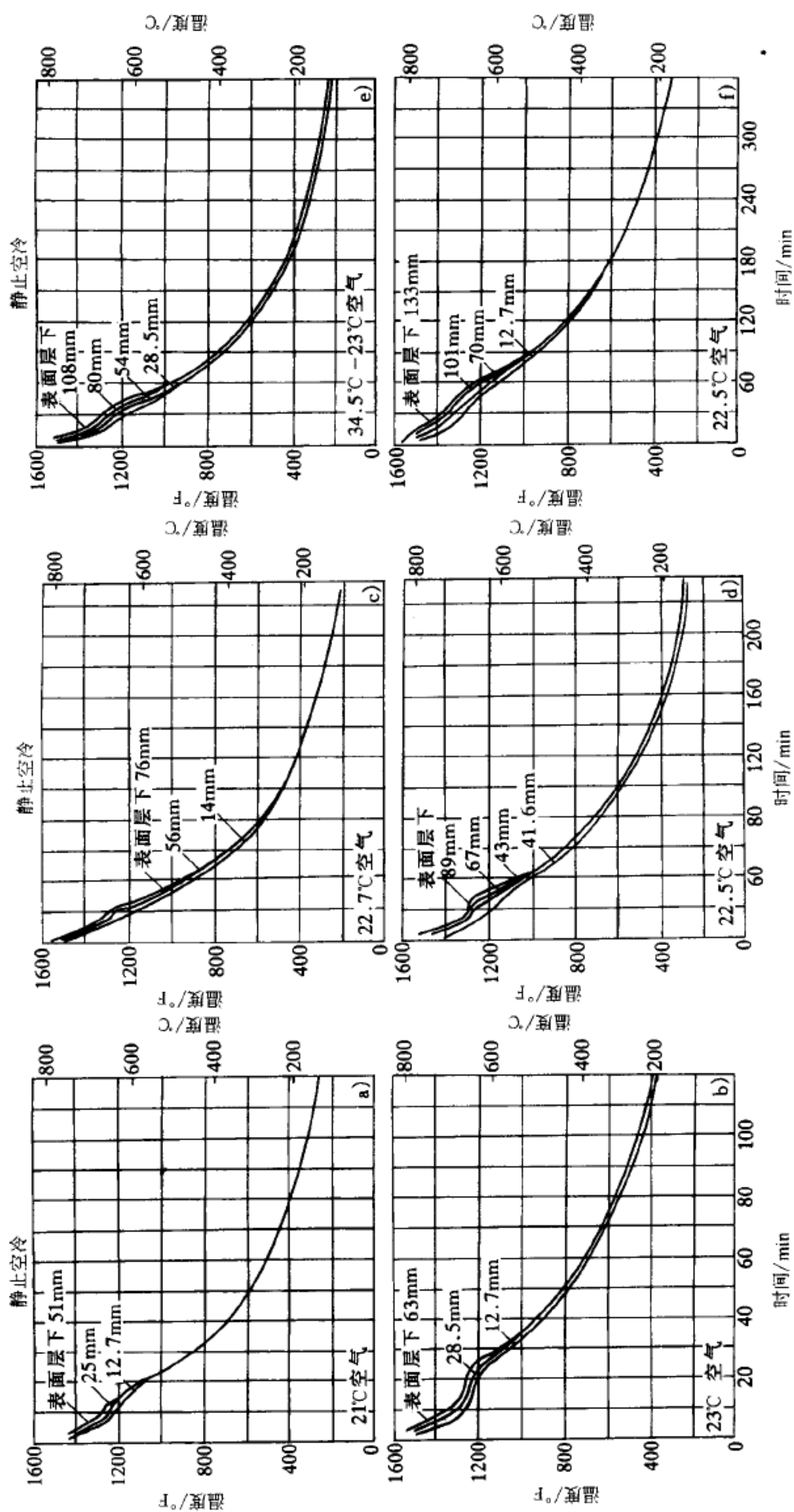


图 6-141 工件在静止空气中冷却时质量和尺寸对冷却曲线的影响

a) 1035 钢 $\phi 101\text{mm}$ 约重 19.5kg b) 1035 钢 $\phi 127\text{mm}$ 约重 38.5kg c) 1020 钢 $\phi 152\text{mm}$ 约重 62kgd) 1040 钢 $\phi 210\text{mm}$ 约重 186kg e) 1040 钢 $\phi 266\text{mm}$ 约重 323kg f) 1040 钢 $\phi 323\text{mm}$ 约重 323kg

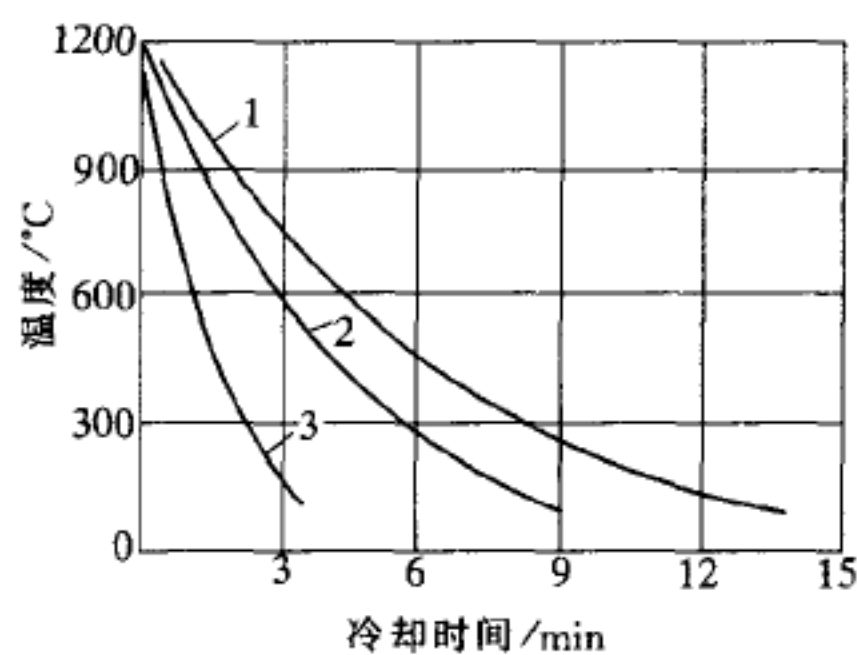


图 6-142 在 $\phi 300\text{mm} \times 500\text{mm}$ 圆筒形炉中的气氛压强对冷却曲线的影响
1— 0.6MPa N_2 2— 0.6MPa H_2 3— 2MPa N_2

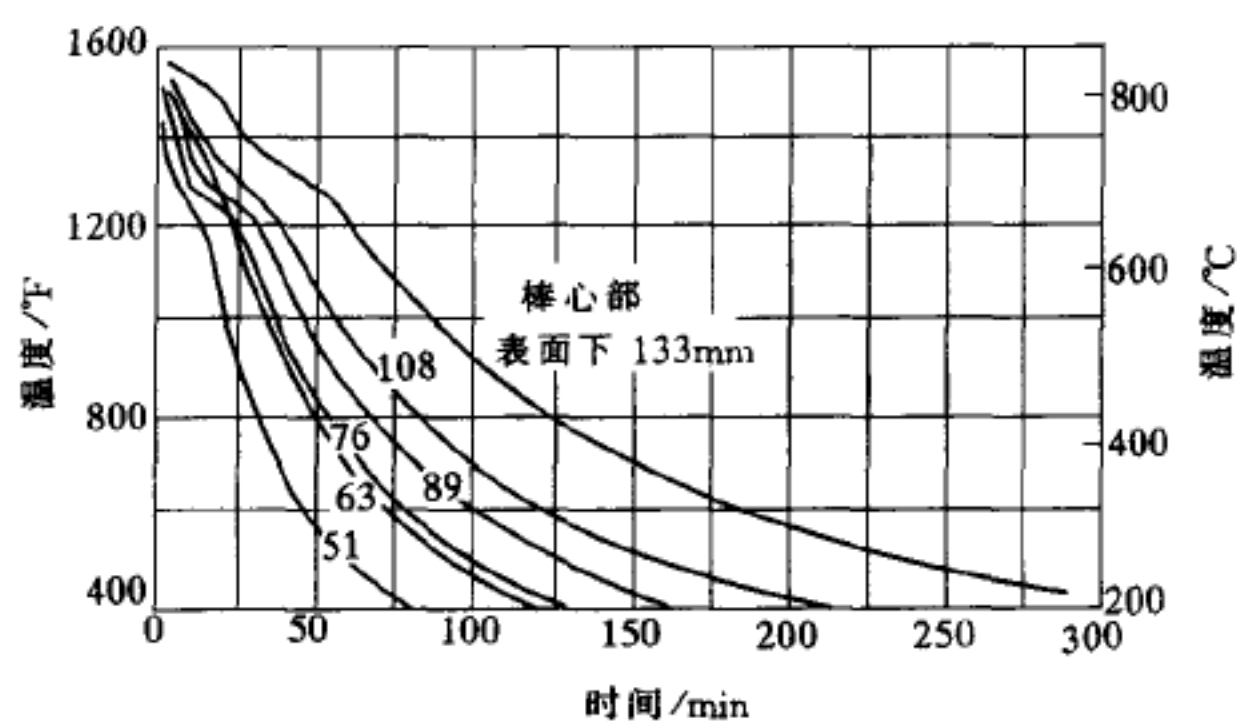


图 6-143 钢棒表面下不同深度在静止空气中的冷却曲线

表 6-45 H_2 、 He 、 N_2 、 Ar 的物理性质

性 质	H_2	He	N_2	Ar	性 质	H_2	He	N_2	Ar
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	0.303	0.601	4.207	6.008	热导率/ $10^4 \text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	2256	1901	326	222
比热容/ $\text{J}(\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	14450	5200	1050	520	动力粘度/ $10^6 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	10.8	24.4	21.6	28.2

6.11 畸变与开裂（图 6-144 ~ 图 6-150 和表 6-46 ~ 表 6-51）

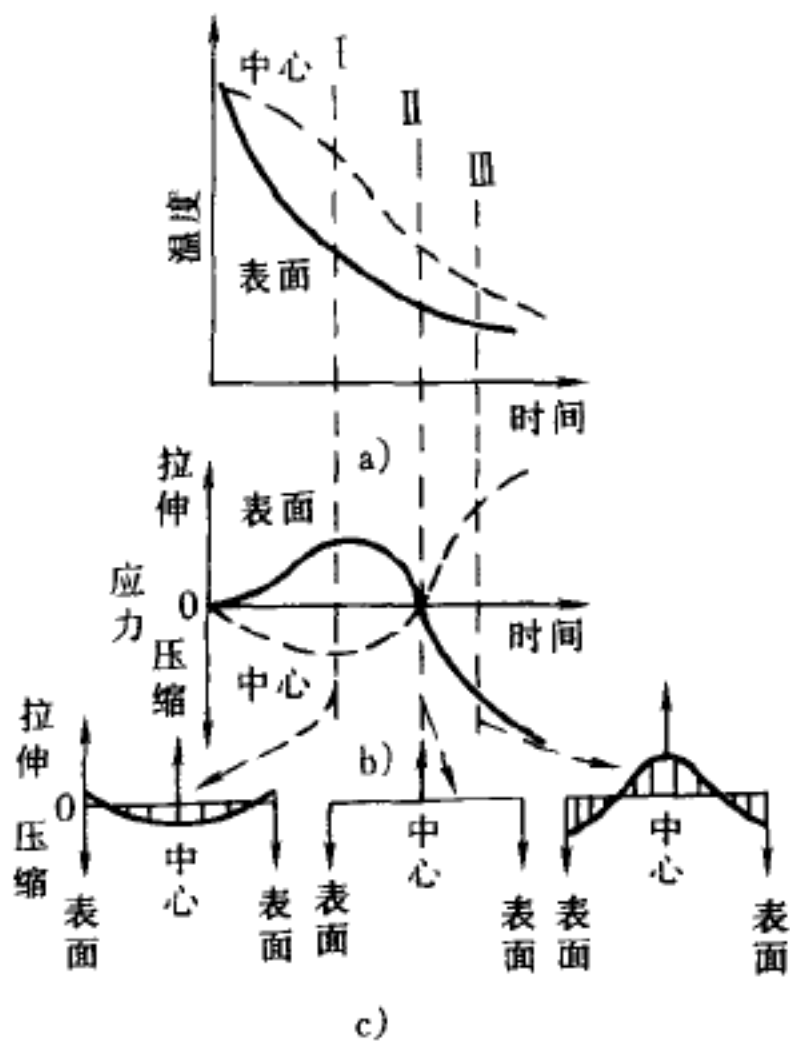


图 6-144 热应力随时间的变化

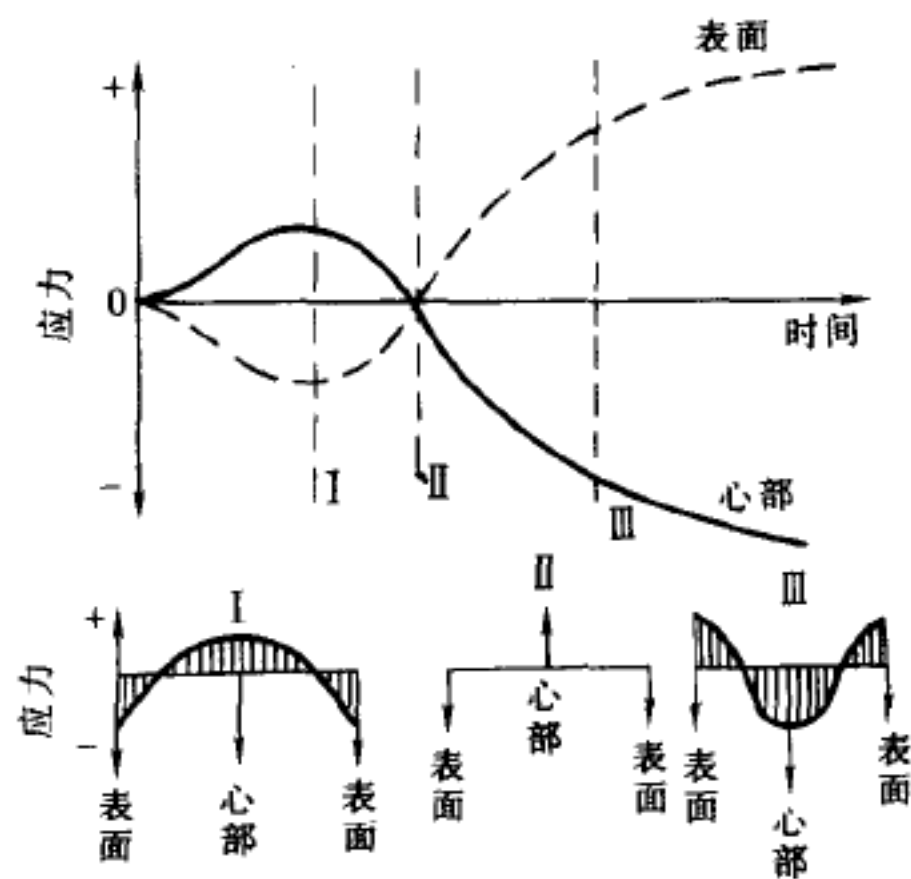


图 6-145 组织应力随时间的变化

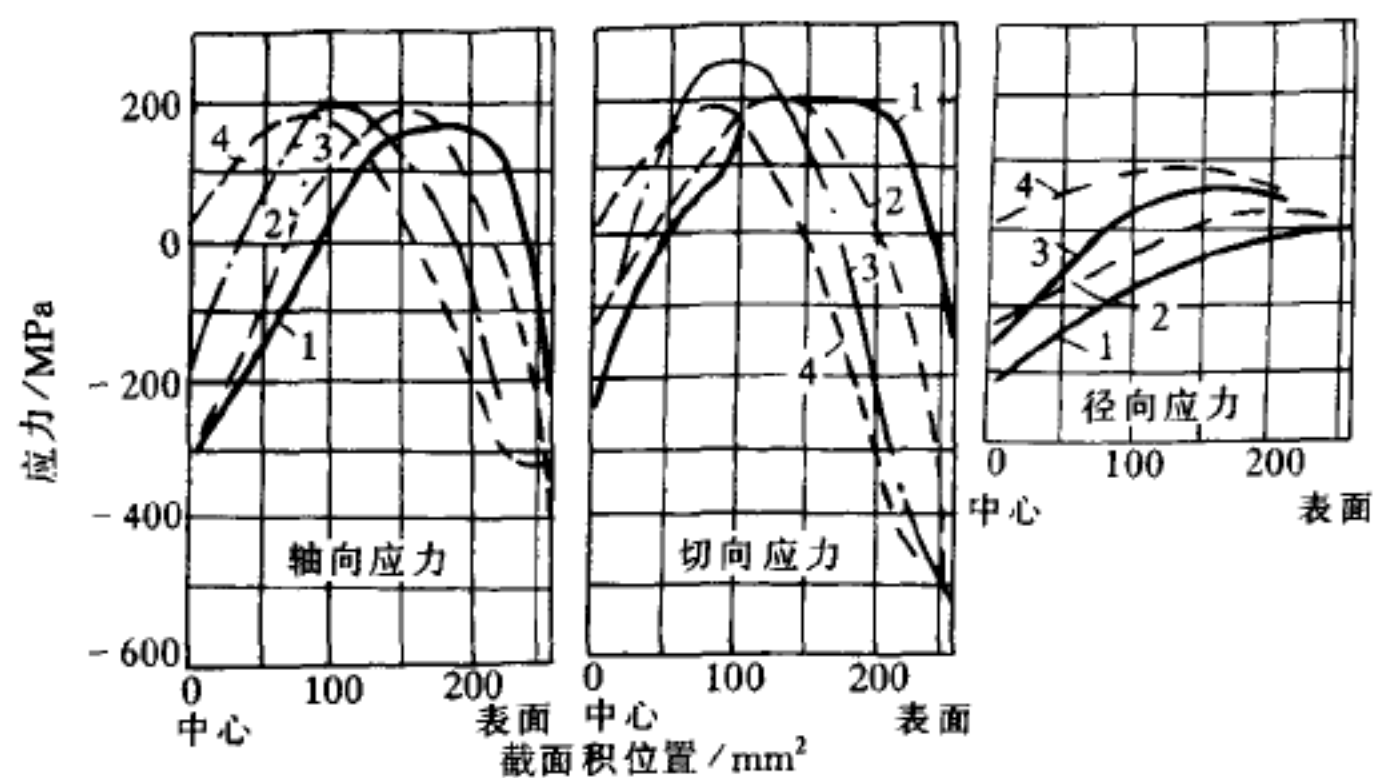
图 6-146 碳含量对圆柱体残留应力的影响 ($\phi 18\text{mm}$, 850°C 水淬)1— $w_c = 0.98\%$ 2— $w_c = 0.51\%$ 3— $w_c = 0.35\%$ 4— $w_c = 0.20\%$

表 6-46 工件淬火畸变特征

零件种类	轴类	扁平形	正方形	圆(方)孔体	扁圆(方)孔体
热处理前					
热应力畸变	d^+, l^- 	d^-, l^+ 	趋向球形 	d^-, D^+, l^- 	D^-, d^-
组织应力畸变	d^-, l^+ 	d^+, l^- 	平面内凹棱角突出 	d^+, D^-, l^+ 	D^+, d^-
体积效应畸变	d^+, l^+ 或 d^-, l^- 	d^+, l^+ 或 d^-, l^- 	d^+, l^+ 或 d^-, l^- 	d^+, D^-, l^+ 或 d^-, D^+, l^- 	D^-, d^+, l^- 或 D^+, d^-, l^+

注：1. 当圆(方)孔体的内径 d 很小时，则畸变规律如轴类或正方体类；当扁圆(方)孔体的内径 d 很小时，则畸变规律如扁平体。

2. “-”表示收缩趋向，“+”表示胀大趋向。

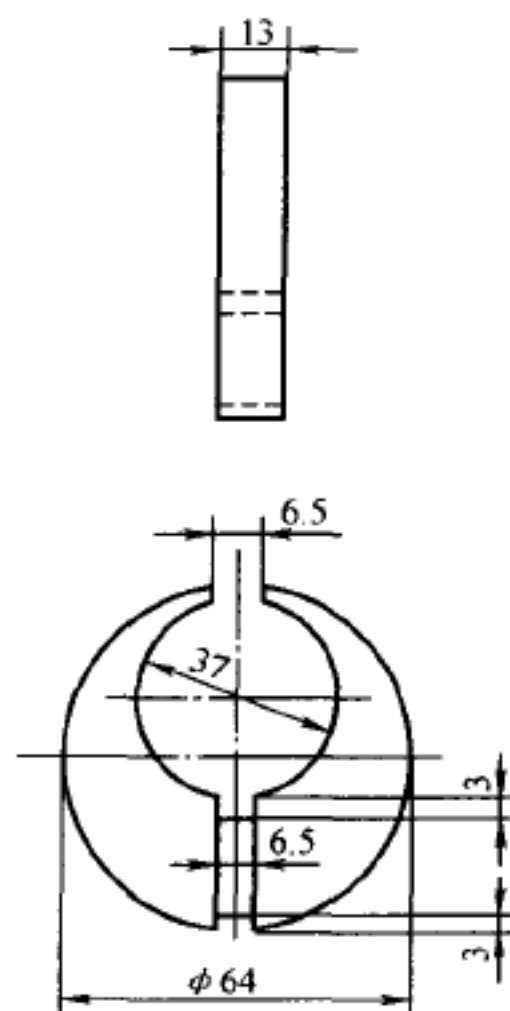


图 6-147 C 形环畸变试样

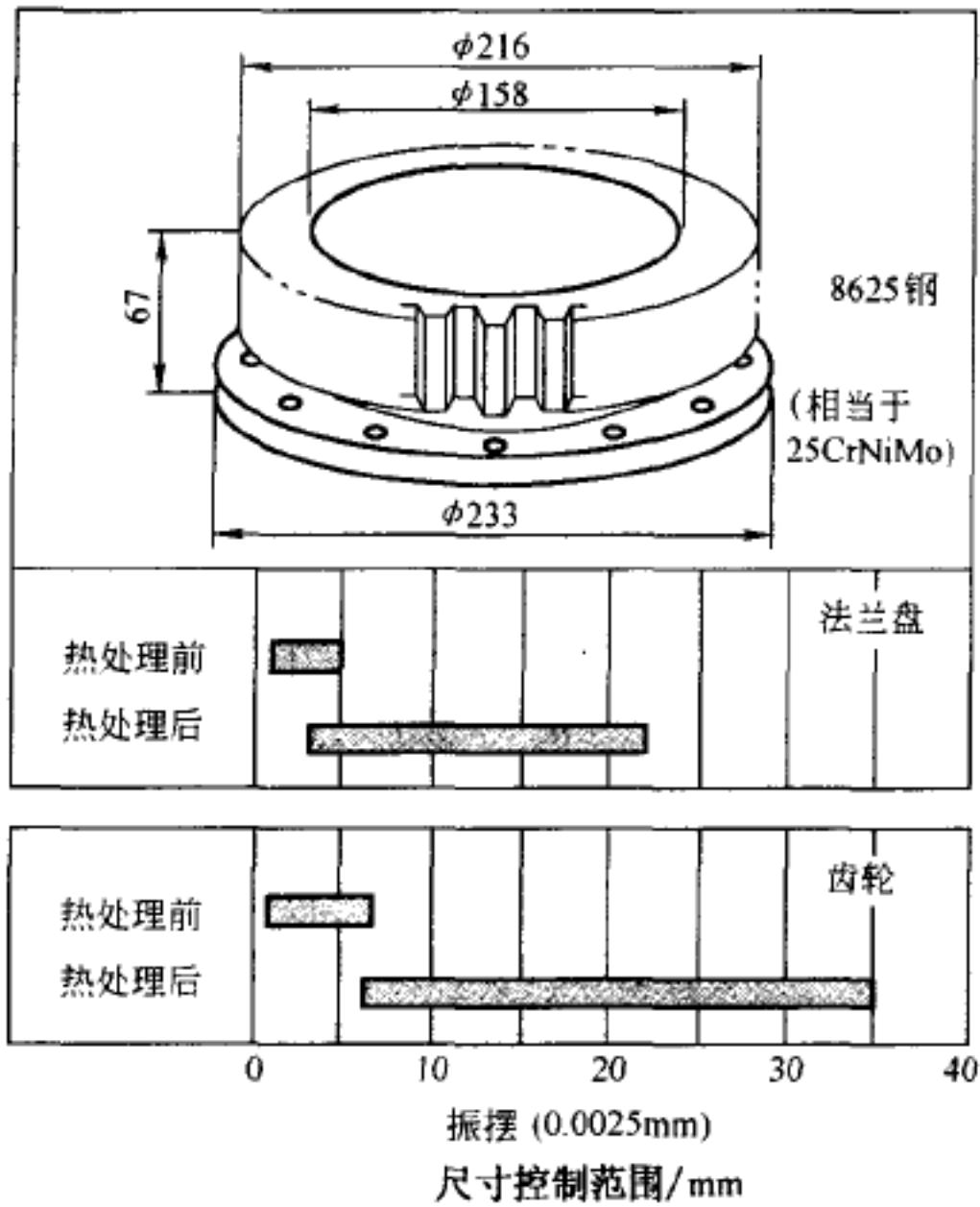


图 6-148 8 个 8625 钢齿圈渗碳 (渗层 1.27mm) 后在 190℃ 油中分级淬火, 加柱塞空冷到室温的尺寸控制范围

表 6-47 环形工件在水、盐和碱的水溶液中淬火畸变

冷却介质 (质量分数) (%)	介质温度 /℃	循环速度 /m·s ⁻¹	挠度差的平均值 /mm	硬 度 HRC
水	20	0.5	+ 0.39	54 ~ 60
	60	0.5	+ 0.425	53 ~ 59
	20	0	+ 0.56	52 ~ 59
10% 的 NaOH 水溶液	20	0.5	+ 0.22	55 ~ 60
50% NaOH 水溶液	20	0.5	+ 0.12	58 ~ 60
75% NaOH 水溶液	115	0.5	+ 0.05	54 ~ 57
10% NaCl 水溶液	20	0.5	+ 0.18	56 ~ 60
锭子油	20	0.5	- 0.13	18 ~ 23

注: 测量畸变系根据有切口的圆环的挠度差进行的, 环的外径为 57mm 并有直径 30mm 的偏心孔。

表 6-48 钢中各种组织组成物的比容

组织成分	碳含量 (%) (质量分数)	比体积/cm ³ ·g ⁻¹	组织成分	碳含量 (%) (质量分数)	比体积/cm ³ ·g ⁻¹
奥氏体	0 ~ 2	0.1212 + 0.0033 (w _C %)	渗碳体	6.7 ± 0.2	0.136 ± 0.001
马氏体	0 ~ 2	0.1271 + 0.0025 (w _C %)	ε 碳化物	8.6 ± 6.7	0.140 ± 0.002
铁素体	0 ~ 0.02	0.1271	珠光体		0.1271 + 0.0005 (w _C %)

表 6-49 马氏体转变时的体积变化

钢的碳含量 (质量分数) (%)	马氏体的密度 /g·cm ⁻³	退火态的密度 /g·cm ⁻³	生成马氏体的 体积变化 (%)	钢的碳含量 (质量分数) (%)	马氏体的密度 /g·cm ⁻³	退火态的密度 /g·cm ⁻³	生成马氏体的 体积变化 (%)
0.1	7.918	7.927	+ 0.113	0.85	7.808	7.905	+ 1.227
0.3	7.889	7.921	+ 0.401	1.00	7.778	7.901	+ 1.557
0.6	7.840	7.913	+ 0.923	1.30	7.706	7.892	+ 2.576

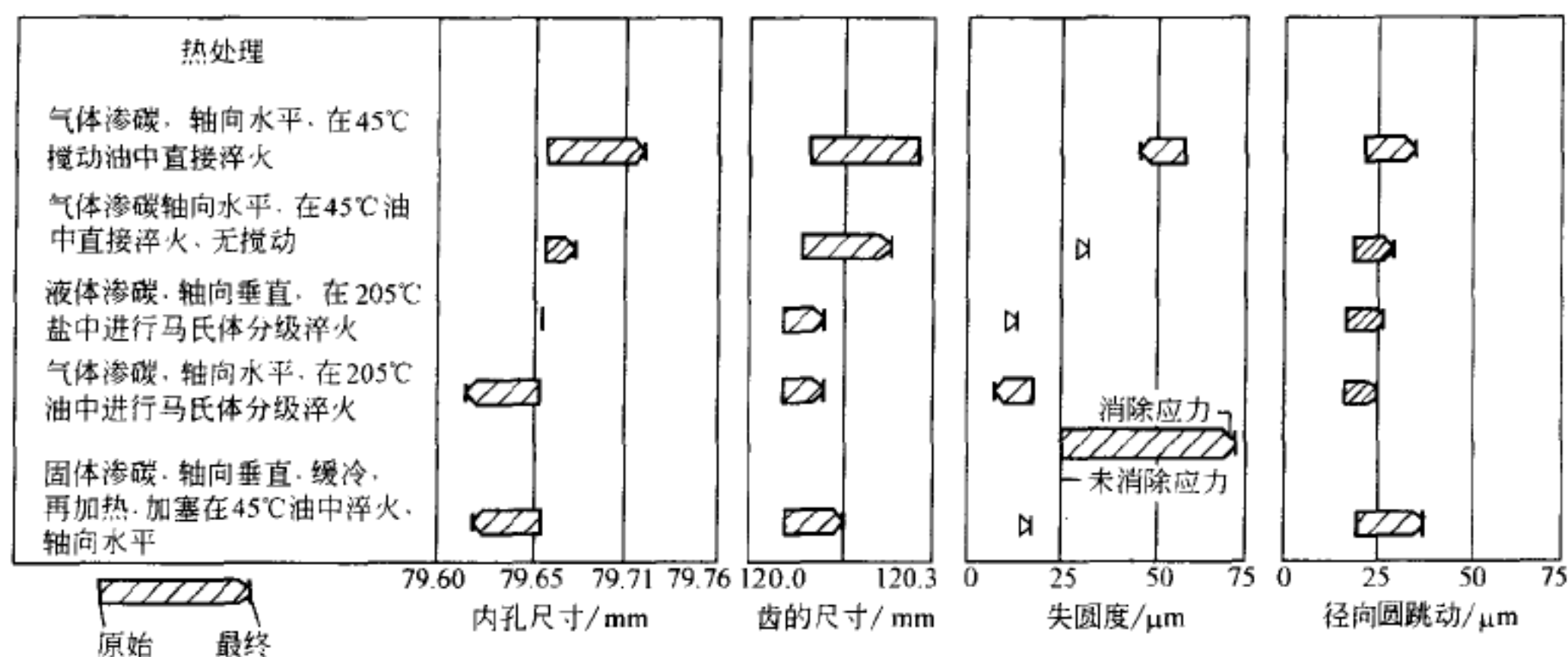


图 6-149 不同渗碳和淬火方法对 4620H 钢制变速传动的倒车惰轮尺寸的影响
齿轮渗碳到深度为 0.8 ~ 1.0mm，并淬火达到硬度为 58 ~ 63HRC

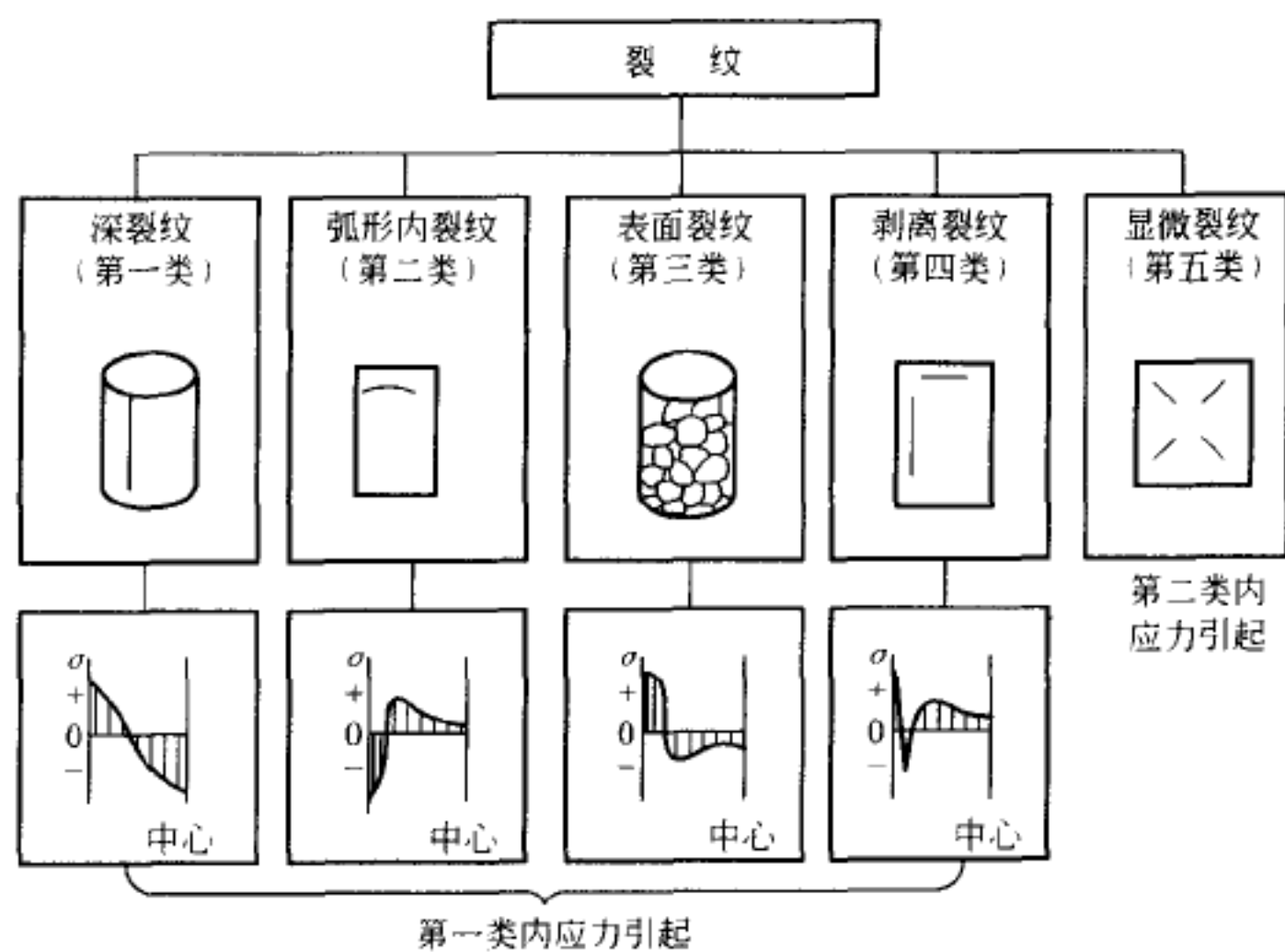


图 6-150 淬火裂纹类型及形成裂纹的内应力
表 6-50 碳素工具钢组织转变引起的尺寸变化

组 织 转 变	体 积 变 化 (%)	尺 寸 变 化 (%)
球化组织→奥氏体	$-4.64 + 2.21 (w_c \%)$	$-0.0155 + 0.0074 (w_c \%)$
奥氏体→马氏体	$4.64 - 0.53 (w_c \%)$	$0.0155 + 0.0018 (w_c \%)$
球化组织→马氏体	$1.68 (w_c \%)$	$0.0056 (w_c \%)$
奥氏体→下贝氏体	$4.64 - 1.43 (w_c \%)$	$0.0156 - 0.0048 (w_c \%)$
球化组织→下贝氏体	$0.78 (w_c \%)$	$0.0026 (w_c \%)$
奥氏体→铁素体 + 渗碳体	$4.64 - 2.21 (w_c \%)$	$0.0155 - 0.0074 (w_c \%)$
球化组织→铁素体 + 渗碳体	0	0

表 6-51 淬火开裂原因及防止措施

裂纹类型	特征	形成条件	防止措施
纵向裂纹	由表及里、深而长	淬透工件易发生, 原材料有碳化物带状偏析或非金属夹杂物延伸	控制原材料质量, 合理选择预备热处理以改善原始组织
弧形裂纹	常位于工件角落处, 隐于表面层下	易发生于未淬透工件或渗碳淬火件	改变工件设计、截面过渡圆角合理化
网状裂纹	位于工件表面、深度 0.01 ~ 2mm	表层脱碳件、化学热处理和表面淬火件易出现	采取加热保护, 避免脱碳、延缓淬火冷却, 降低淬火温度
剥离开裂	表现为淬硬层剥离	表面淬火件或化学热处理件	合理选择介质, 延缓冷却
显微裂纹	在显微组织缺陷处	淬火件高碳马氏体针附近	避免加热过热和晶粒粗大

第 7 章 钢的常规热处理

7.1 钢的退火和正火工艺规范及性能(表 7-1 ~ 表 7-31)

表 7-1 常用结构钢(含渗碳钢)退火和正火工艺规范

钢 号	退 火		正 火	
	加热温度/℃	硬度 HBW≤	加热温度/℃	硬度 HBW≤
10	—	—	900 ~ 940	—
15	—	—	900 ~ 940	—
20	—	—	880 ~ 920	—
25	—	—	860 ~ 880	—
30	—	—	850 ~ 900	—
35	—	—	840 ~ 890	—
40	840 ~ 870	—	840 ~ 890	—
45	820 ~ 840	—	830 ~ 880	—
50	820 ~ 840	—	820 ~ 870	—
55	770 ~ 810	—	810 ~ 860	—
20Mn	—	—	880 ~ 900	—
30Mn	—	—	850	—
40Mn	—	—	840 ~ 870	—
50Mn	820 ~ 840	179 ~ 228	—	—
20Mn2	—	—	870 ~ 900	—
30Mn2	830 ~ 860	207	840 ~ 880	—
35Mn2	830 ~ 880	207	840 ~ 860	241
40Mn2	820 ~ 850	217	840 ~ 860	241
45Mn2	810 ~ 840	217	820 ~ 860	187 ~ 241
50Mn2	810 ~ 840	229	820 ~ 860	—
35SiMn	850 ~ 870	229	880 ~ 920	—
42SiMn	830 ~ 850	229	860 ~ 890	—
15MnV	720	187	880 ~ 900	217
20MnV	670 ~ 700	187	880 ~ 900	207
25Mn2V	650 ~ 710	207	880 ~ 910	—
42Mn2V	850	197	850 ~ 880	255
35B	850 ~ 870	207	870	—
40B	840 ~ 870	207	850 ~ 900	—
45B	780 ~ 800	217	850 ~ 890	—

(续)

钢 号	退 火		正 火	
	加热温度/℃	硬度 HBW ≤	加热温度/℃	硬度 HBW ≤
50B	800 ~ 820	207	880 ~ 950	≥ 20HRC
40MnB	820 ~ 860	207	860 ~ 920	229
45MnB	820 ~ 910	217	840 ~ 900	229
20Mn2B	—	—	880 ~ 900	—
30Mn2B	—	—	870 ~ 890	—
35Mn2B	670 ~ 700	207	860 ~ 900	241
45Mn2B	670	207	860 ~ 900	—
15MnVB	780	207	—	—
20MnVB	—	—	880 ~ 900	217
40MnVB	830 ~ 900	207	860 ~ 900	229
25MnTiB	670 ~ 690	229	920 ~ 960	207
20Mn2TiB	680 ~ 720	207	950 ~ 970	207
40MnWB	680 ~ 720	207	880 ~ 900	—
20MnMoB	900 ~ 960 加热降至 660 ~ 680 等温 4 ~ 5h	207	900 ~ 950	217
40MnMoB	670 ~ 700	207	880 ~ 900	229
40Mn2MoB	690 ~ 710	241	880 ~ 900	—
20SiMnVB	690 ~ 710 加热 降至 600 以下空冷	207	920 ~ 950	170 ~ 207
23SiMn2Mo	700	229	920 ~ 950	—
24SiMnMoVA	680 ~ 720	269	880 ~ 920	207 ~ 269
25SiMnMoVA	720	229	900 ~ 930	—
42Si2MnMoVA	670 ~ 700	269	910	—
20SiMn2MoVA	690 ~ 730	269	920 ~ 950	—
25SiMn2MoVA	680 ~ 700	255	920 ~ 950	—
27SiMn2MoVA	650 ~ 700	269	880 ~ 920	—
30SiMn2MoVA	680	269	880 ~ 900	—
32Si2Mn2MoV	680 ~ 700	—	900 ~ 920	—
37SiMn2MoV	830 ~ 850	—	860 ~ 890	—
35SiMn2MoVA	860 ~ 880	227	880 ~ 900	321
	680 ~ 720	269		
30Mn2MoTiBA	—	—	880 ~ 900	—
24MnMoVA	690 ~ 710	229	920 ~ 940	229
42MnMoV	820 ~ 850	—	—	—
37Si2MnCrNiMoV	740 ~ 760	—	950	—
15SiMn3MoA	—	—	920 ~ 950	—

(续)

钢 号	退 火		正 火	
	加热温度/℃	硬度 HBW ≤	加热温度/℃	硬度 HBW ≤
12SiMn2WVA	—	—	900 ~ 930	—
37SiMn2MoWVA	—	—	880 ~ 920	—
15SiMn3MoWVA	—	—	950	—
30Mn2MoWA	670	269	880 ~ 920	300 ~ 350
15Cr	—	—	870 ~ 900	270
20Cr	860 ~ 890	179	870 ~ 900	270
30Cr	—	—	860	—
35Cr	—	—	850 ~ 870	—
40Cr	825 ~ 845	207	850 ~ 880	250
45Cr	840 ~ 850	217	830 ~ 850	320
50Cr	800 ~ 820	—	830 ~ 850	—
20CrV	—	—	880 ~ 920	—
40CrV	—	—	850 ~ 880	—
45CrV	810 ~ 830	255	—	—
35CrSi	860 ~ 880	—	880 ~ 900	—
37CrSi	860 ~ 880	—	880 ~ 900	—
38CrSi	860 ~ 880	255	900	350
20CrMo	—	—	880 ~ 920	—
25CrMo	850	217	850 ~ 870	—
30CrMo	830 ~ 850	229	870 ~ 900	400
35CrMo	820 ~ 840	—	830 ~ 860	—
42CrMo	850	—	850 ~ 900	—
35CrMoV	870 ~ 900	—	880 ~ 920	—
15CrMn	—	—	880 ~ 900	—
20CrMn	—	—	880 ~ 920	—
40CrMn	680 ~ 720	197 ~ 217	860 ~ 880	—
35CrMn2	840	—	870	—
15CrMnMo	860 ~ 880	197	890 ~ 950	—
20CrMnMo	850 ~ 870	217	880 ~ 930	190 ~ 228
40CrMnMo	820 ~ 850	241	850 ~ 880	321
60CrMnMo	—	—	820 ~ 840	—
18Cr2MnMoB	850 ~ 870	—	870 ~ 890	—
20Cr2Mn2Mo	—	—	910 ~ 930	—
20CrMnTi	680 ~ 720	217	920 ~ 950	160 ~ 207
30CrMnTi	—	—	940 ~ 960	207
40CrMnTi	—	—	860 ~ 880(+ 580 回火)	241

(续)

钢 号	退 火		正 火	
	加热温度/℃	硬度 HBW≤	加热温度/℃	硬度 HBW≤
20CrMnSiA	860 ~ 870	207	880 ~ 920	—
25CrMnSiA	840 ~ 860	217	860 ~ 880(+ 600 回火)	229
30CrMnSiA	880 ~ 910	—	890 ~ 910	—
35CrMnSiA	840 ~ 860	229	860 ~ 880(+ 700 回火)	229
30CrMnSiNi2A	650 ~ 680	255	900 ~ 920	—
15CrMn2SiMoA	670 ~ 700	229	880 ~ 920	270 ~ 320
20CrNi	—	—	900 ~ 920	197
40CrNi	810 ~ 830	207	840 ~ 860	—
45CrNi	800 ~ 830	—	—	—
50CrNiA	820 ~ 850	—	900 ~ 920 (+ 680 ~ 700 回火)	180 ~ 207
12CrNi2A	670 ~ 700	207	880 ~ 920	207
12CrNi3A	670 ~ 680	229	880 ~ 940	—
20CrNi3A	840 ~ 860	217	860 ~ 890	—
30CrNi3A	810 ~ 830	241	840 ~ 860	—
37CrNi3	800	—	840 ~ 860	—
12Cr2Ni4A	650 ~ 680	269	890 ~ 940	—
20Cr2Ni4A	810 ~ 870 650 ~ 670	217 229	860 ~ 900	—
18Cr2Ni4WA	—	—	900 ~ 980	—
20CrNiMo	660	197	880 ~ 920	143 ~ 196
40CrNiMoA	840 ~ 880	269	890 ~ 920	—
34CrNi3Mo	850	—	850(+ 650 回火)	—
45CrNiMoVA	850 ~ 860	269	880	—
30CrNi2MoVA	680	241	900 ~ 920	—
38CrMoAlA	840 ~ 870	229	930 ~ 970	—
25CrMnMoTiBA	—	—	900 ~ 920	—
30CrMnMoTiA	—	—	950 ~ 970	217
30CrMnSiNi2MoA	660 ~ 700	255	900 ~ 920	—
12Cr2Mn2SiMoV	—	—	940 ~ 980	—
20Ni4Mo	670	269	880	—
34CrNi1Mo	650 ~ 700	235	850 ~ 880	—

注:退火——加热后炉冷;正火——加热后空冷。

表 7-2 合金钢退火推荐的温度和时间

钢 号	奥氏体 化温度 /℃	常 规 冷 却			等 温 方 法		
		温度 /℃	冷 速 /℃·h ⁻¹	时 间 /h	冷 到 /℃	保 温 /h	硬度(≈) HBW
获得主要为珠光体组织							
40Mn2(1340)	830	735 ~ 610	11	11	620	4.5	183
40MnNi4(2340)	800	655 ~ 555	8.3	12	595	6	201
45MnNi4(2345)	800	655 ~ 550	9.1	12.7	595	6	201
20CrNi(3120)	885	—	—	—	650	4	179
40CrNi(3140)	830	735 ~ 650	11	7.5	660	6	187
50CrNi(3150)	830	705 ~ 645	11	5.5	660	6	201
10Cr2Ni4(3310)	870	—	—	—	595	14	187
40MnMo(4042)	830	745 ~ 640	11	9.5	660	4.5	197
45MnMo(4047)	830	735 ~ 630	11	9	660	5	297
60MnMo(4062)	830	695 ~ 630	8.3	7.3	660	6	223
30CrMo(4130)	855	765 ~ 665	20	5	675	4	174
42CrMo(4140)	845	755 ~ 665	14	6.4	675	5	197
50CrMnMo(4150)	830	745 ~ 670	8.4	8.6	675	6	212
20CrNi2Mo(4320)	885	—	—	—	660	6	197
40CrNiMo(4340)	830	705 ~ 565	8.3	16.5	650	8	223
20Ni2Mo { (4620)	885	—	—	—	650	6	187
(4640)	830	715 ~ 600	7.6	15	620	8	197
20Ni4Mo(4820)	—	—	—	—	605	4	192
40Cr(5045)	830	755 ~ 665	11	8	660	4.5	192
20Cr(5120)	885	—	—	—	690	4	179
30Cr(5132)	845	755 ~ 670	11	7.5	675	6	183
40Cr(5140)	830	740 ~ 670	11	6	675	6	187
50Cr(5150)	830	705 ~ 650	11	5	675	6	201
GCr15(5210)	—	—	—	—	—	—	—
50CrVA(6150)	830	760 ~ 675	8.4	10	675	6	201
20CrNiMo(8620)	885	—	—	—	660	4	187
25CrNiMo(8630)	845	735 ~ 640	11	8.5	660	6	192
40MnCrNiMo(8640)	830	725 ~ 640	11	8	660	6	197
50MnCrNiMo(8650)	830	710 ~ 650	8.4	7.2	650	8	212
60MnCrNiMo(8660)	830	700 ~ 655	8.4	8	650	8	229
20CrNiMo(8720)	885	—	—	—	660	4	187
40MnCrNiMo(8740)	830	725 ~ 645	11	7.5	660	7	201
50MnCrNiMo(8750)	830	720 ~ 630	8.4	10.7	660	7	217
60Si2Mn(9260)	860	760 ~ 705	8.4	6.7	660	6	229
10CrNi3Mo(9310)	870	—	—	—	595	14	187
获得主要为铁素体和球状碳化物组织							
20Mn2(1320)	805	—	—	—	650	8	170
40Mn2(1340)	750	735 ~ 610	5.5	22	640	8	174
35Ni4(2340)	715	655 ~ 555	5.5	18	605	10	192
45Ni4(2345)	715	655 ~ 550	5.5	19	605	10	192
20CrNi2(3120)	790	—	—	—	650	8	163
40CrNi(3140)	745	735 ~ 650	5.5	15	660	10	174
50CrNi(3150)	750	705 ~ 645	5.5	11	660	10	187

表 7-3 常用结构钢(含渗碳钢)高温回火(软化)工艺规范

钢 号	加热温度/℃	硬度 HBW ≤	钢 号	加热温度/℃	硬度 HBW ≤
20Mn2	670 ~ 700	187	40Cr	680 ~ 700	207
30Mn2	680 ~ 720	207	45Cr	680 ~ 700	217
35Mn2	680 ~ 720	207	38CrSi	660 ~ 690	255
40Mn2	830 ~ 870	—	30CrMo	700 ~ 720	250
45Mn2	600 ~ 710	217	42CrMo	680 ~ 700	217
50Mn2	670 ~ 710	229	15CrMnMo	700 ~ 720	227
20MnV	670 ~ 700	187	20CrMnMo	660 ~ 710	227
25Mn2V	670 ~ 700	207	40CrMnMo	660 ~ 680	241
35SiMn	680 ~ 720	229	60CrMnMo	620 ~ 640	—
42SiMn	680 ~ 720	229	20Cr2Mn2Mo	640 ~ 690	—
40B	660 ~ 680	207	20CrMnSiA	680 ~ 720	207
45B	680 ~ 720	217	25CrMnSiA	630 ~ 710	217
50B	680 ~ 720	207	30CrMnSiA	680 ~ 710	229
40MnB	650 ~ 680	229	35CrMnSiA	680 ~ 710	229
45MnB	680	217	30CrMnSiNi2A	650 ~ 680	255
20Mn2B	680	187	15CrMn2SiMoA	650 ~ 700	229
45Mn2B	670	229	40CrNi	670 ~ 690	241
20MnVB	680	207	50CrNiA	680 ~ 700	180 ~ 207
40MnVB	660 ~ 700	229	12CrNi2A	650 ~ 700	207
40MnWB	680 ~ 720	207	12CrNi3A	670 ~ 680	229
20MnMoB	680 ~ 700	207	20CrNi3A	670 ~ 690	229
20SiMn2MoV	690 ~ 730	269	30CrNi3A	650 ~ 680	241
25SiMn2MoVA	680 ~ 700	255	12Cr2Ni4A	650 ~ 680	229
30SiMn2MoV	680 ~ 700	269	20Cr2Ni4A	630 ~ 650	229
35SiMn2MoVA	680 ~ 720	269	18Cr2Ni4WA	650 ~ 700	269
12SiMn2WVA	660 ~ 680	269	20CrNiMo	670	—
15SiMn3MoA	670	269	40CrNiMoA	670 ~ 700	269
37SiMn2MoWVA	650 ~ 700	269	34CrNi3Mo	650	—
15SiMn3MoWVA	670	269	45CrNiMoVA	670	269
30Mn2MoWA	650 ~ 680	269	30CrNi2MoVA	680	250
40Mn2MoB	680 ~ 700	229	38CrMoAlA	700 ~ 720	229
30Mn2MoTiB	680	241	25CrMnMoTiBA	670 ~ 720	269
23SiMn2Mo	680 ~ 720	229	30CrMnMoTiA	700 ~ 730	229
24SiMnMoVA	650 ~ 700	241	30CrMnSiNi2MoA	650 ~ 680	255
27SiMn2MoVA	670 ~ 700	269	12Cr2Mn2SiMoV	660 ~ 690	269
40Si2MnMoVA	650 ~ 700	269	20Ni4Mo	640	269
15Cr	700 ~ 720	179	34CrNi1Mo	650 ~ 680	—
20Cr	700 ~ 720	179			

表 7-4 常用结构钢正火后的力学性能

钢 号	正火温度 /℃	力学性能 ≥					HBW ≤
		σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ (%)	ψ (%)	a_K /J·cm ⁻²	
40	860	575	313	20	36	68	
45	820 ~ 840	670 ~ 720	340	15 ~ 18	45 ~ 50	50	170 ~ 240
30Mn2	870	600	350	15	45	80	
35Mn2	860	630	370	13	40		
	840 ~ 860	590	300	13	43		
45Mn2	850	812	514	21	63	117	223
50Mn2	830	780	460	22	56	7	206
	850	810	520	22	53	7	218
	870	830	560	21	55	9	223
42SiMn	850	835	510	22	49	54	244
42Mn2V	850 ~ 870	820	590	23	66	119	187
35B	870	540	320	20	45	70	—
40B	860	580	340	19	45	60	—
45B	850	610	360	16	40	50	—
50B	860	655	330	26	51	—	—
45MnB	890	730	410	17	66	62	—
	920	740	410	16	66	26	—
20Mn2B	920	615	425	29	72	183	—
20MnVB	860 ~ 880	590	367	30	69	160	—
40MnVB	840	730	430	15	62	70	—
20MnMoB	900	635	460	24	66	185	179
	930	675	545	23	66	140	200
20SiMnVB	860 ~ 880	637	380	27	72	119	—
40Cr	860	740	460	17	62	108	—
40CrMnMo	850	1115	935	12	36	31	—

表 7-5 常用结构钢退火后的力学性能

钢 号	退火温度 /℃	力学性能 ≥					HBW ≤
		σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ (%)	ψ (%)	a_K /J·cm ⁻²	
45	820 ~ 840	532	280	32	49	60	160 ~ 200
35Mn2	775	689	390	23	57	48	179
42Mn2V	850	645	385	21	59	99	170
45MnB	910	660	400	18	52	43	—
40Cr	910	660	410	16	66	126	—
	850 ~ 860	692	396	19	51	82	—
25CrMnSiA	820	640	425	23	54	—	—

表 7-6 部分碳钢和合金钢在热轧、正火和退火条件下的性能

AISI 钢号 ^①	处理状态 /℃	力学性能					硬 度 HBW
		σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ (%) ^②	ψ (%)	$a_{KV}/J \cdot cm^{-2}$	
15(1015)轧态		420	315	39.0	61	111	126
正火	925	425	325	37.0	70	116	121
退火	870	385	285	37.0	70	115	111
20(1020)轧态		450	330	36.0	59	87	143
正火	870	440	345	35.8	68	118	131
退火	870	395	295	36.5	66	123	111
20Mn(1022)轧态		505	360	35.0	67	81	149
正火	925	485	360	34.0	68	117	143
退火	870	450	315	35.0	64	121	137
30(1030)轧态		550	345	32.0	57	75	179
正火	925	520	345	32.0	61	94	149
退火	845	465	340	31.2	58	69	126
40(1040)轧态		620	415	25.0	50	49	201
正火	900	590	375	28.0	55	65	170
退火	790	520	355	30.2	57	44	149
50(1050)轧态		725	415	20.0	40	31	229
正火	900	750	425	20.0	39	27	217
退火	790	635	365	23.7	40	17	187
60(1060)轧态		815	485	17.0	34	18	241
正火	900	775	420	18.0	37	13	229
退火	790	625	370	22.5	38	11	179
80(1080)轧态		965	585	12.0	17	7	293
正火	900	1010	525	11.0	21	7	293
退火	790	615	375	24.7	45	8	174
T10(1095)轧态		965	570	9.0	18	4	293
正火	900	1015	500	9.5	14	5	293
退火	790	655	380	13.0	21	3	192
20Mn(1117)轧态		485	305	33.0	63	81	143
正火	900	465	305	33.5	54	85	137
退火	860	430	280	32.8	58	94	121
20Mn2(1118)轧态		520	315	32.0	70	109	149
正火	925	480	320	33.5	66	104	143
退火	790	450	285	34.5	67	100	131
35Mn2(1137)轧态		625	380	28.0	61	83	192
正火	900	670	395	22.5	49	64	197
退火	790	585	345	26.8	54	50	174
40Mn2(1141)轧态		675	360	22.0	38	11	192
正火	900	705	405	22.7	56	53	201
退火	815	600	355	25.5	49	34	163
45Mn2(1144)轧态		705	420	21.0	41	53	212
正火	900	665	400	21.0	40	43	197
退火	790	585	345	24.8	41	65	167

(续)

AISI 钢号 ^①	处理状态 /℃	力学性能					硬 度 HBW
		σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ (%) ^②	ψ (%)	$\alpha_{KV}/J \cdot cm^{-2}$	
40Mn2(1340)正火	870	835	560	22.0	63	93	248
退火	800	705	435	25.5	57	71	207
40CrNi2(3340)正火	870	890	600	19.7	57	54	262
退火	815	690	425	24.5	51	46	197
30CrMo(4130)正火	870	670	435	25.5	60	86	197
退火	865	560	360	28.2	56	62	156
42CrMo(4140)正火	870	1020	655	17.7	47	23	302
退火	815	655	415	25.7	57	55	197
50CrMo(4150)正火	870	1155	735	11.7	31	12	321
退火	815	730	380	20.2	40	25	197
20Cr2NiMo(4320)正火	895	795	465	20.8	51	73	235
退火	850	580	425	29.0	58	110	163
40CrNiMo(4340)正火	870	1280	860	12.2	36	16	363
退火	810	745	470	22.0	50	51	217
20Ni2Mo(4620)正火	900	575	365	29.0	67	133	174
退火	860	510	370	31.3	60	94	149
20Ni4Mo(4820)正火	860	755	485	24.0	59	110	229
退火	815	680	465	22.3	59	93	197
40Cr(5140)正火	870	795	470	22.7	59	38	229
退火	830	570	295	28.6	57	41	167
50Cr(5150)正火	870	870	530	20.7	59	32	255
退火	825	975	355	22.0	44	25	197
60CrMnA(5160)正火	860	955	530	17.5	45	11	269
退火	810	725	275	17.2	31	10	197
50CrVA(6150)正火	870	940	615	21.8	61	36	269
退火	815	665	410	23.0	48	27	197
20CrNiMo(8620)正火	910	635	355	26.3	60	100	183
退火	870	535	385	31.3	62	112	149
30CrNiMo(8630)正火	870	650	430	23.5	54	95	187
退火	845	565	370	29.0	59	95	156
50CrNiMo(8650)正火	870	1025	690	14.0	45	14	302
退火	795	715	385	22.5	46	29	212
40MnCrNiMo(8740)正火	870	930	605	16.0	48	18	269
退火	815	695	415	22.2	46	40	201
55Si2Mn(9255)正火	900	935	580	19.7	43	14	269
退火	845	775	485	21.7	41	9	229
10CrNi4Mo(9310)正火	890	905	570	18.8	58	119	269
退火	845	820	440	17.3	42	79	241

① 除 1100 系列是粗晶粒外,各种钢都是细晶粒。

② 标距 50mm。

表 7-7 常用弹簧钢退火和正火工艺规范

钢 号	退火加热温度/℃	正火加热温度/℃	钢 号	退火加热温度/℃	正火加热温度/℃
60	800 ~ 820	800 ~ 850	50CrMnVA	—	850 ~ 880
65	790 ~ 810	820 ~ 860	45CrMoV	740 ~ 780	—
70	790 ~ 810	800 ~ 840	55Si2Mn	—	830 ~ 860
75	780 ~ 800	—	60Si2Mn	—	830 ~ 860
80	780 ~ 800	800 ~ 840	70Si3Mn	760 ~ 790	—
85	780 ~ 800	—	55SiMnVB	800 ~ 840	840 ~ 880
60Mn	820 ~ 840	820 ~ 860	55SiMnMoV	800 ~ 840	850 ~ 880
65Mn	780 ~ 840	820 ~ 860	55SiMnMoVNb	800 ~ 840	840 ~ 880
50CrVA	810 ~ 870	850 ~ 880	30W4Cr2VA	740 ~ 780	—
50CrMn	800 ~ 820	800 ~ 840			

注：退火——加热后炉冷；正火——加热后空冷。

表 7-8 常用弹簧钢高温回火(软化)工艺规范

钢 号	加热温度/℃	冷却方式	钢 号	加热温度/℃	冷却方式
65Mn	680 ~ 720	—	60Si2Mn	640 ~ 680	空气
50CrVA	640 ~ 700	—	55SiMnVB	640 ~ 680	空气
50CrMn	650 ~ 700	油或水	55SiMnMoV	640 ~ 680	空气
55Si2Mn	640 ~ 680	空气	55SiMnMoVNb	640 ~ 680	空气

表 7-9 热轧弹簧和冷拔(卷)弹簧钢丝去应力回火

钢 号	热轧弹簧		冷拔弹簧钢丝	
	加热温度/℃	冷 却	加热温度/℃	冷 却
65Mn	—	—	250 ~ 360	空气
50CrVA	400 ~ 500	油或水	315 ~ 370	空气
60Si2Mn	—	—	230 ~ 400	空气

表 7-10 50CrVA 钢正火和退火后的力学性能

	温度/℃	力学性能(≥)					
		σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ (%)	ψ (%)	a_K /J·cm ⁻²	HBW
正火	830	770	550	20	63	—	288
退火	810	680	450	24	63	70	—

表 7-11 常用轴承钢普通退火工艺规范

钢 号	加热温度/℃	加热时间/h	冷却速度/℃·h ⁻¹ ≤	出炉温度/℃	硬 度 HBW ≤
GCr6	780 ~ 800	—	—	—	170 ~ 207
GCr9	790 ~ 810	2 ~ 6	10 ~ 30	650	207 ~ 229
GCr15	790 ~ 810	2 ~ 6	10 ~ 30	650	170 ~ 207
G8Cr15	770 ~ 790	2 ~ 6	20	750 ~ 650	197 ~ 207
GCr9SiMn	760 ~ 790	—	—	—	217

(续)

钢 号	加热温度 /℃	加热时间 /h	冷却速度 /℃·h ⁻¹ ≤	出炉温度 /℃	硬 度 HBW ≤
GCr15SiMn	790 ~ 810	2 ~ 6	10 ~ 30	600	170 ~ 207
GSiMn(RE)	760	4 ~ 5	20	650	217
GmnMoV(RE)	780	4 ~ 6	20	750→680	179 ~ 217
GCrSiWV	780 ~ 800	2 ~ 4	20	720→600	197 ~ 217
Cr4Mo4V	680 ~ 710	4 ~ 6	20	550	197 ~ 250
Cr14Mo4V	880 ~ 1000	4 ~ 6	15 ~ 30	740→600	197 ~ 241
9Cr18Mo	850 ~ 870	4 ~ 6	30	600	255
70Mn15Cr2Al3 WMoV2	870 ~ 890	3 ~ 6	—	500	270 ~ 276

表 7-12 常用轴承钢等温退火工艺规范

钢 号	加热温度 /℃	加热时间 /h	等温温度 /℃	等温时间 /h	硬 度 HBW
GCr9	790 ~ 810	2 ~ 6	710 ~ 720	1 ~ 2	207 ~ 209
GCr15	790 ~ 810	2 ~ 6	710 ~ 720	1 ~ 2	207 ~ 209
GCr15SiMn	790 ~ 810	2 ~ 6	710 ~ 720	1 ~ 2	207 ~ 209
GSiMn(RE)	750 ~ 780	7	705 ~ 725	4→(10℃/h)500℃	181 ~ 207
GSiMnV(RE)	760 ~ 780	12 ~ 14	710	4→(30℃/h)650	217
GSiMnMoV(RE)	770	12 ~ 14	710	4→(30℃/h)650	179 ~ 217
Cr4Mo4V	840 ~ 860	4 ~ 6	720 ~ 740	4→(30℃/h)550	197 ~ 241

表 7-13 常用轴承钢正火工艺规范

钢 号	加热温度/℃	保温时间/h	冷却方式	硬度 HBW
GCr15	900 ~ 950	1 ~ 2	分散空冷	270 ~ 590
GCr15SiMn	900 ~ 950	10 ~ 90min	分散空冷	270 ~ 390
GSiMnV(RE)	900	20 ~ 60min	空气	32HRC
GSiMnMoV(RE)	900	40 ~ 60min	空气	35HRC

表 7-14 常用轴承钢退火后的力学性能

钢 号	退火温度 /℃	力学性能 ≥					
		σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ (%)	ψ (%)	a_K /J·cm ⁻²	HBW
GCr9	—	730	420	21	46	45	170
GCr15	770 ~ 780	600 ~ 730	360 ~ 420	15 ~ 25	25 ~ 59	45 ~ 90	179 ~ 207
G8Cr15	790	645	—	30	69	—	—
GSiMn(RE)	760	684 ~ 700	382 ~ 385	26 ~ 28	47	—	185 ~ 210
GSiMnVRE	770	735	450	25	50	60	179 ~ 207
GSiMnMoV(RE)	770	708	449	23	54	—	204
GMnMoV(RE)	780	735	485	21	44	55	203

(续)

钢 号	退火温度 /℃	力学性能 ≥					
		σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ (%)	ψ (%)	a_K /J·cm ⁻²	HBW
GCrSiWV	—	830 ~ 840	735 ~ 790	20 ~ 22	43	—	229
Cr4Mo4V	—	710 ~ 740	—	20 ~ 26	44 ~ 55	20 ~ 40	187 ~ 207
Cr14Mo4V	890	790	—	14	19	—	240
9Cr18Mo	850	760	—	14	27	16	255
70Mn15Cr2Al3WMoV2	1180(水)	720 ~ 820	—	60	61	23	—

表 7-15 常用轴承钢正火后的力学性能

钢 号	正火温度 /℃	力学性能 ≥					
		σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ (%)	ψ (%)	a_K /J·cm ⁻²	HRC
GCr15	900	1210	—	—	—	78	39
G8Cr15	—	880	525	18	59	31	249HBW
GSiMnV(RE)	900	1260	—	—	—	—	32
GSiMnMoV(RE)	900	1360	—	—	—	—	35

表 7-16 常用高速钢退火工艺规范

钢 号	加热温度/℃	硬度 HBW ≤	
		软化退火	等温退火
W18Cr4V	860 ~ 880	277	255
9W18Cr4V	850 ~ 870	285	262
W18Cr4VCo5	840 ~ 900	262	262
W18Cr4VCo10	850 ~ 910	285	285
W18Cr4VSiNbAl	870 ~ 890	352	341
W14Cr4VMnRE	870 ~ 890	277	255
W12Cr4V4Mo	840 ~ 860	285	262
W12Cr4V5Co5	850 ~ 870	285	277
W12Mo3Cr4V3N	840 ~ 860	293	285
W12Mo3Cr4V3Co5Si	860 ~ 880	285	269
W10Mo4Cr4V3Al	840 ~ 860	285	269
W10Mo4Cr4V3Co10	850 ~ 870	311	302
W9Cr4V2	840 ~ 860	228 ~ 255	228 ~ 255
W6Mo5Cr4V2	840 ~ 860	285	255
W6Mo5Cr4V3	850 ~ 870	277	255
W6Mo5Cr4V2Al	850 ~ 870	285	269
W6Mo5Cr4V2Co5	840 ~ 860	285	269
W6Mo3Cr4V5Co5	850 ~ 870	285	277
W6Mo4Cr4V5Co5	870 ~ 900	241 ~ 277	241 ~ 277
W6Mo5Cr4V5SiNbAl	850 ~ 870	285	269

(续)

钢 号	加热温度/℃	硬度 HBW ≤	
		软化退火	等温退火
W2Mo8Cr4V	820 ~ 870	207 ~ 235	207 ~ 235
W2Mo9Cr4V2	800 ~ 850	277	255
W2Mo9Cr4VCo8	860 ~ 880	285	269
W2Mo10Cr4VCo5	870 ~ 900	235 ~ 269	235 ~ 269
W2Mo10Cr4VCo8	870 ~ 900	207 ~ 255	207 ~ 255
FW12Cr4V5Co5	860	—	277
FW10Mo5Cr4V2Co2	860	—	280 ~ 302

注:1. 所有退火加热均应缓慢加热。

2. 退火加热保温时间一般为 2h。

3. 软化退火冷却方式为以 20 ~ 30℃/h 冷至 500 ~ 600℃后炉冷或出炉堆放冷却。

4. 等温退火冷却方式为炉冷至 740 ~ 760℃后保温 2 ~ 4h,然后炉冷至 500 ~ 600℃出炉空冷。

5. FW12Cr4V5Co5 钢和 FW10Mo5Cr4V2Co2 钢等温退火冷却方式为炉冷至 750℃后保温 4h,然后炉冷至 300 ~ 400℃出炉空冷。

表 7-17 碳素工具钢退火和正火工艺规范

钢 号	正火加热温度/℃	退 火	
		加热温度/℃	硬度 HBW ≤
T7、T7A	800 ~ 820	730 ~ 750	187
T8、T8A	760 ~ 780	740 ~ 760	187
T9、T9A	790 ~ 830	750 ~ 780	201
T10、T10A	800 ~ 850	760 ~ 780	197
T11、T11A	840 ~ 860	760 ~ 790	202
T12、T12A	840 ~ 860	760 ~ 780	207
T13	—	680 ~ 710	210
T8MnA	—	740 ~ 760	207

表 7-18 碳素工具钢的球化退火规范

钢 号	加热温度/℃	冷 却 规 范	等温退火的等温温度/℃
T7	750 ~ 770	透烧后以 40 ~ 50℃/h 的速度冷至 500 ~ 550℃取出空冷	600 ~ 650
T8、T9	750 ~ 770		600 ~ 650
T10	750 ~ 770		620 ~ 660
T11、T12	750 ~ 770		640 ~ 650

表 7-19 常用工(冷)模具钢退火工艺规范

钢 号	一般退火		等温退火	
	加热温度/℃	硬度 HBW ≤	加热温度/℃	等温温度/℃
Cr	775 ~ 800	129 ~ 229	—	—
Cr06	750 ~ 770	187 ~ 241	750 ~ 790	680 ~ 700
Cr2	770 ~ 800	179 ~ 207	770 ~ 790	680 ~ 700
9Cr2	800 ~ 820	179 ~ 217	800 ~ 820	670 ~ 680

(续)

钢 号	一般退火		等温退火	
	加热温度/℃	硬度 HBW ≤	加热温度/℃	等温温度/℃
8Cr3	790 ~ 810	207 ~ 225	—	—
Cr12	850 ~ 870	269	830 ~ 850	720 ~ 740
9Mn2	750 ~ 770	229	760 ~ 780	680 ~ 700
V	770 ~ 790	156 ~ 201	750 ~ 770	620 ~ 680
8V	730 ~ 780	207	—	—
W	760 ~ 800	183 ~ 207	780 ~ 800	650 ~ 680
W2	750 ~ 800	217	—	—
SiCr	770 ~ 800	230	—	—
9SiCr	780 ~ 800	197 ~ 241	790 ~ 810	700 ~ 720
CrV	790 ~ 815	174 ~ 201	—	—
8CrV	770 ~ 790	170 ~ 207	—	—
9CrV	760 ~ 790	255	—	—
CrMn	770 ~ 800	207	—	—
CrW	790 ~ 810	230	—	—
5CrW	750 ~ 800	201	—	—
CrW5	780 ~ 800	229 ~ 285	800 ~ 820	670 ~ 700
Cr12W	870 ~ 900	217 ~ 255	—	—
Cr12Mo	850 ~ 870	217 ~ 255	—	—
MnSi	740 ~ 760	187 ~ 229	760 ~ 780	680 ~ 700
8MnSi	730 ~ 750	229	—	—
5MnSi	720 ~ 760	220	—	—
7MnSi2	760 ~ 790	192 ~ 229	—	—
55Si2Mn	760 ~ 790	192 ~ 229	—	—
9Mn2V	750 ~ 770	229	760 ~ 780	680 ~ 700
4CrW2Si	800 ~ 820	179 ~ 229	—	—
5CrW2Si	800 ~ 820	207 ~ 255	—	—
6CrW2Si	800 ~ 820	229 ~ 285	—	—
Cr6WV	830 ~ 850	229	830 ~ 850	700 ~ 720
CrWMn	770 ~ 790	207 ~ 255	780 ~ 800	710 ~ 730
9CrWMn	770 ~ 790	187 ~ 228	780 ~ 800	670 ~ 720
WCrV	750 ~ 800	217	—	—
W3CrV	800 ~ 850	229	—	—
8W2CrV	750 ~ 800	212	—	—
Cr5MoV	845 ~ 870	201 ~ 229	—	—
Cr12MoV	850 ~ 870	207 ~ 255	850 ~ 870	720 ~ 740
55SiMoV	760 ~ 790	192 ~ 217	—	—

(续)

钢 号	一般退火		等温退火	
	加热温度/℃	硬度 HBW ≤	加热温度/℃	等温温度/℃
SiMnMo	—	—	790 ~ 810	700
7W7Cr4MoV	840 ~ 860	229	840 ~ 860	730 ~ 750
MnCrWV	760 ~ 790	223	770 ~ 790	640 ~ 660
Cr4W2MoV	850 ~ 870	269	850 ~ 870	750 ~ 770
6W6Mo5Cr4V	850 ~ 860	197 ~ 229	850 ~ 860	740 ~ 750
6Cr4Mo3Ni2WV	800 ~ 820	255	800 ~ 820	650 ~ 670
65Cr4W3Mo2VNb	850 ~ 870	217	850 ~ 870	730 ~ 750
6Cr6W3MoVSi	860 ~ 880	255	—	—
Cr2Mn2SiWMoV	—	—	780 ~ 800	700 ~ 720

注:1. 一般退火均热后保温 3 ~ 6h, 冷却速度 $\leq 30^{\circ}\text{C}/\text{h}$, 500 ~ 600℃ 出炉空冷。

2. 等温退火均热后保温 2 ~ 3h, 等温保温时间 3 ~ 4h, 炉内冷却速度 $\leq 30^{\circ}\text{C}/\text{h}$, 500 ~ 600℃ 出炉空冷。

表 7-20 工具钢的正火退火温度(AISI 钢号)

类 型	正火处理温度 ^① /℃	退火 ^②		
		温度/℃	冷速最大/℃·h ⁻¹	硬度 HBW
钨高速钢				
M1, M16	不正火	815 ~ 870	22	207 ~ 235
M2	不正火	870 ~ 900	22	212 ~ 241
M3, M4	不正火	870 ~ 900	22	223 ~ 255
M6	不正火	870	22	248 ~ 277
M7	不正火	815 ~ 870	22	217 ~ 255
M30, M33, M34, M36, M41, M42, M46, M47	不正火	870 ~ 900	22	235 ~ 269
M43	不正火	870 ~ 900	22	248 ~ 269
M44	不正火	870 ~ 900	22	248 ~ 293
钨高速钢				
T1	不正火	870 ~ 900	22	217 ~ 255
T2	不正火	870 ~ 900	22	223 ~ 255
T4	不正火	870 ~ 900	22	229 ~ 269
T5	不正火	870 ~ 900	22	235 ~ 277
T6	不正火	870 ~ 900	22	248 ~ 293
T8	不正火	870 ~ 900	22	229 ~ 255
T15	不正火	870 ~ 900	22	241 ~ 277
铬热作钢				
H10, H11, H12, H13	不正火	845 ~ 900	22	192 ~ 229
H14	不正火	870 ~ 900	22	207 ~ 235
H19	不正火	870 ~ 900	22	207 ~ 241
钨热作钢				
H21, H22, H25	不正火	870 ~ 900	22	207 ~ 235
H23	不正火	870 ~ 900	22	212 ~ 255
H24, H26	不正火	870 ~ 900	22	217 ~ 241
钼热作钢				
H41, H43	不正火	815 ~ 870	22	207 ~ 235
H42	不正火	845 ~ 900	22	207 ~ 235

(续)

类 型	正火处理温度 ^① /℃	退火 ^②		
		温度/℃	冷速最大/℃·h ⁻¹	硬度 HBW
高碳高铬冷作钢				
D2, D3, D4	不正火	870 ~ 900	22	217 ~ 255
D5	不正火	870 ~ 900	22	223 ~ 255
D7	不正火	870 ~ 900	22	235 ~ 262
中合金空淬冷作钢				
A2	不正火	845 ~ 870	22	201 ~ 229
A3	不正火	845 ~ 870	22	207 ~ 229
A4	不正火	740 ~ 760	14	200 ~ 241
A6	不正火	730 ~ 745	14	217 ~ 242
A7	不正火	870 ~ 900	14	235 ~ 262
A8	不正火	845 ~ 870	22	192 ~ 223
A9	不正火	845 ~ 870	14	212 ~ 248
A10	790	765 ~ 795	8	235 ~ 268
油淬冷作钢				
O1	870	760 ~ 790	22	183 ~ 212
O2	845	745 ~ 775	22	183 ~ 212
O6	870	765 ~ 790	11	183 ~ 217
O7	900	790 ~ 815	22	192 ~ 217
耐冲击钢				
S1	不正火	790 ~ 815	22	183 ~ 229 ^③
S2	不正火	760 ~ 790	22	192 ~ 217
S5	不正火	775 ~ 800	14	192 ~ 229
S7	不正火	815 ~ 845	14	187 ~ 223
模具钢				
P2	不要求	730 ~ 815	22	103 ~ 122
P3	不要求	730 ~ 815	22	109 ~ 137
P4	不正火	870 ~ 900	14	116 ~ 128
P5	不要求	845 ~ 870	22	105 ~ 116
P6	不要求	845	8	183 ~ 217
P20	900	760 ~ 790	22	149 ~ 172
P21	900		不退火	
低合金特殊用途钢				
L2	871 ~ 900	760 ~ 790	22	163 ~ 197
L3	900	790 ~ 815	22	174 ~ 201
L6	870	760 ~ 790	22	183 ~ 212
碳钨特殊用途钢				
F1	900	760 ~ 800	22	183 ~ 207
F2	900	790 ~ 815	22	207 ~ 235
水淬钢				
W1, W2	790 ~ 925 ^④	740 ~ 790 ^⑤	22	156 ~ 202
W5	870 ~ 925	760 ~ 790	22	163 ~ 201

① 保温时间从小截面的 15min 到大截面的 1h, 在静止空气中冷却。正火不能与低温退火混淆;

② 上限用于大截面, 下限用于小截面, 保温时间从薄截面的 1h 到厚截面的和合金钢的大装炉料的 4h;

③ 0.25Si 型为 183 ~ 207HBW, 1.0Si 型为 207 ~ 229HBW;

④ 对各种不同碳含量的温度为: $w_C 0.6\% \sim 0.75\%$, 815℃; $w_C 0.75\% \sim 0.90\%$, 790℃; $w_C 0.9\% \sim 1.10\%$, 870℃; $w_C 1.10\% \sim 1.40\%$, 870 ~ 925℃;⑤ 不同碳含量时的温度为: $w_C 0.6\% \sim 0.90\%$, 740 ~ 790℃; $w_C 0.9\% \sim 1.46\%$, 760 ~ 790℃。

表 7-21 常用工模具钢调质和高温回火工艺规范

钢 号	调 质		高温回火 /℃
	淬火加热温度/℃	回火温度/℃	
Cr06	800 ~ 820	660 ~ 680	600 ~ 700
Cr2	745 ~ 755	550 ~ 600	600 ~ 700
Cr12	850 ~ 865	550 ~ 600	—
9SiCr	880 ~ 900	680 ~ 700	600 ~ 700
4CrW2Si	—	—	710 ~ 740
5CrW2Si	780 ~ 790	520 ~ 580	710 ~ 740
6CrW2Si	780 ~ 790	520 ~ 580	700 ~ 730
CrWMn	745 ~ 755	550 ~ 600	600 ~ 700
Cr12MoV	850 ~ 865	550 ~ 600	760 ~ 790

注:高温回火工艺为均热后保温 2 ~ 4h。

表 7-22 热作模具钢退火工艺规范

钢 号	一般退火		等温退火		
	加热温度/℃	硬度 HBW ≤	加热温度/℃	等温温度/℃	硬度 HBW ≤
3CrAl	650 ~ 700	235	—	—	—
4CrSi	820 ~ 840	170 ~ 217	—	—	—
6CrSi	820 ~ 840	187 ~ 229	—	—	—
5Cr4Mo	—	—	850 ~ 870	710 ~ 730	—
2Cr9W6V	840 ~ 860	217	—	—	—
3Cr2W8V	840 ~ 860	207 ~ 255	—	—	—
5CrNiMo	740 ~ 760	197 ~ 241	760 ~ 780	680	197 ~ 241
5CrMnMo	760 ~ 780	197 ~ 241	850 ~ 870	680	197 ~ 241
5Cr2MnMo	—	—	850 ~ 870	710 ~ 730	—
5CrNiW	760 ~ 790	197 ~ 241	—	—	—
5CrNiTi	760 ~ 790	197 ~ 235	—	—	—
5W2CrSiV	770 ~ 800	183 ~ 229	—	—	—
4W2CrSiV	710 ~ 750	192 ~ 225	—	—	—
3W4Cr2V	830 ~ 860	241	—	—	—
4SiCrV	820 ~ 840	229	—	—	—
5SiMnMoV	760 ~ 780	217	—	—	—
4CrVMoW	740 ~ 780	200 ~ 238	—	—	—
4Cr5W2SiV	840 ~ 880	241	—	—	—
4Cr5MoV1Si	860 ~ 890	229	—	—	—
4Cr5MoVSi	860 ~ 890	229	—	—	—
5Cr4W5Mo2V	—	—	850 ~ 870	720 ~ 740	255
35Cr3Mo3VCo3	845 ~ 900	192 ~ 229	—	—	—

(续)

钢 号	一般退火		等温退火		
	加热温度/℃	硬度 HBW ≤	加热温度/℃	等温温度/℃	硬度 HBW ≤
4Cr3Mo3W2V	—	—	870	730	255
5Cr2MoNiV	720 ~ 740	255	—	—	—
5CrMnSiMoV	—	—	870 ~ 890	640 ~ 660	241
4Cr4Mo2WVSi	860 ~ 880	229	860 ~ 890	650 ~ 670	229
5Cr4Mo2W2VSi	880 ~ 900	207	880 ~ 900	750 ~ 780	207
3Cr5WMoVSi	845 ~ 900	192 ~ 229	—	—	—
4Cr2W2MoVSi	830 ~ 850	241	—	—	—
5Cr3W3MoVSiNb	840 ~ 880	229	—	—	—
4Cr3W4Mo2VTiNb	870 ~ 900	—	—	—	—
4Cr3Mo3W4VTiNb	840 ~ 860	—	840 ~ 860	710 ~ 730	—
2Cr6W8Mo2Co8VNb	900 ~ 920	250	—	—	—
7Mn15Cr2Al3V2WMo	870 ~ 890	28 ~ 30HRC	—	—	—

注:1. 一般退火均热后保温 4 ~ 8h, 冷却速度 $\leq 30^{\circ}\text{C}/\text{h}$, 500 ~ 600℃ 出炉空冷。

2. 等温退火均热后保温 4 ~ 6h, 等温保温时间 4 ~ 6h, 炉内冷却速度 $\leq 30^{\circ}\text{C}/\text{h}$, $\leq 500^{\circ}\text{C}$ 出炉空冷。

表 7-23 锻模翻新退火和去应力退火工艺规范

钢 号	锻模翻新退火		去应力退火	
	加热温度/℃	硬度 HBW	加热温度/℃	硬度 HBW
5CrNiMo	710 ~ 730	197 ~ 241		
5CrMnMo	720 ~ 740	—		
4Cr5W2SiV	—	—	750 ~ 780	—
4Cr5MoV1Si	—	—	730 ~ 760	—
4Cr5MoVSi	—	—	730 ~ 760	—
5Cr4Mo2W2VSi	—	—	710 ~ 730	—

注:锻模翻新退火和去应力退火应在均热后保温 2 ~ 6h, 炉冷至 $\leq 500^{\circ}\text{C}$ 后出炉空冷。

表 7-24 不锈钢退火工艺规范

钢 号	加热温度/℃	硬度 HBW ≤	钢 号	加热温度/℃	硬度 HBW ≤
0Cr13	800 ~ 850	—	9Cr18	850 ~ 870	207 ~ 255
1Cr13	860	179	1Cr17Ni2	860	250
2Cr13	860	160 ~ 187	(Y)1Cr14S	800 ~ 900	—
3Cr13	860	207	3Cr13Mo	850 ~ 870	—
4Cr13	860	143 ~ 229	(Y)2Cr13Ni2	730	—
Cr17	760 ~ 780	150 ~ 170	9Cr18MoV	800 ~ 850	—

表 7-25 奥氏体不锈钢退火温度 (AISI)

UNS 号	牌 号	温度 ^① /℃
普通型		
S30100, S30200, S30215	301, 302, 302B	1010 ~ 1120
S30300, S30323	303, 303Se	1010 ~ 1120
S30400, S30500, S30800	304, 305, 308	1010 ~ 1120
S30900, S30908	309, 309S	1040 ~ 1120
S31000, S31008	310, 310S	1040 ~ 1065
S31600	316	1040 ~ 1120
S31700	317	1065 ~ 1120
稳定化型		
S32100	321	955 ~ 1065
S34700, S34800	347, 348	930 ~ 1065
N08020	Carpenter20Cb-3	925 ~ 955
低碳型		
S30403	304L, 304LN	1010 ~ 1120
S31603, S31703	316L, 316LN, 317L	1040 ~ 1100
高碳型		
S20100, S20200	201, 202	1010 ~ 1120
S30451	304N	1010 ~ 1120
S31651	316N	1010 ~ 1120
S24100	Nitronic32, Carpenter18Cr-2Ni-12Mn	1010 ~ 1065
S24000	Nitronic33	1040 ~ 1095
S21904	Nitronic40, Carpenter21Cr-6Ni-9Mn	980 ~ 1175
S20910	Nitronic50, Carpenter22Cr-13Ni-5Mn	1065 ~ 1120
S21800	Nitronic60	1040 ~ 1095
S28200	Carpenter18-18 PLUS	1040 ~ 1095
高合金型		
N08904	317LM, 317LX, 317L, PLUS, 317LMO, 7L4	1120 ~ 1150
N08028	904L, AL-4X, 2RK65 Sanicro28	1075 ~ 1125
N08366	AL-6X	1205 ~ 1230
S31254	254SMO	1150 ~ 1205

① 表中列出的温度、适合于复合构件的退火。保温时间和冷却方法取决于工件的厚度。小截面可以按每 2.5mm 厚度保温 3 ~ 5min, 随后空冷。大截面的水淬。很多类型钢不需要焊后热处理。合金的订货和供货可以详细协商。虽然从退火温度必须快冷, 但也必须符合对变形的限制。

表 7-26 铁素体不锈钢退火温度 (AISI)

UNS 号	牌 号	退火温度/℃	UNS 号	牌 号	退火温度/℃
普通铁素体型			低间隙铁素体型		
S40500	405	650 ~ 815	S43035	439	870 ~ 925
S40900	409	870 ~ 900	S44400	444	955 ~ 1010
S43000	430	705 ~ 790	S44626	E-RRITE	760 ~ 955
S43020	430F	705 ~ 790	S44660	SEA-CURE, SC-1	1010 ~ 1065
S43400	434	705 ~ 790		AL29-4C	1010 ~ 1065
S44600	446	760 ~ 830	S44800	AI29-4-2	1010 ~ 1065
			S44635	MONIT	1010 ~ 1065

注: 低间隙铁素体不锈钢一般没有必要, 并且并不希望进行焊后热处理。这类不锈钢的任何退火后, 应进行水淬或快速冷却。

表 7-27 马氏体不锈钢的退火温度和工艺

牌 号	工序间(亚临界温度)退火	完全退火	等温退火/℃	
	温度/℃ ^① 硬度	温度/℃ ^{②、③} 硬度	工艺 ^④	硬度
1Cr12 (403、410) 1Cr13	650 ~ 670 86 ~ 92HRB	830 ~ 885 75 ~ 85HRB	加热到 830 ~ 850℃ 在 705 保温 6h	85HRB
1Cr13Ni2(424)	650 ~ 730 99HRB ~ 24HRC	不推荐	不推荐	
Y1Cr13(416)、416(Se)	650 ~ 760 86 ~ 92 HRB	830 ~ 885 75 ~ 85HRB	加热到 830 ~ 850℃ 在 720 保温 2h	85HRB
2Cr13(420)	675 ~ 760 94 ~ 97 HRB	830 ~ 850 86 ~ 95HRB	加热到 830 ~ 850℃ 在 705℃ 保温 2h	95HRB
1Cr17Ni2(431)	620 ~ 705 99HRB ~ 30 HRC	不推荐	不推荐	
7Cr17(440A)	675 ~ 760 90HRB ~ 22 HRC	845 ~ 900 94 ~ 98HRB	加热到 845 ~ 900℃ 在 690℃ 保温 4h	98HRB
8Cr17(440B)	675 ~ 760 98HRB ~ 23HRC	845 ~ 900 95HRB ~ 20HRC	同 440A	20HRC
11Cr17 Y11Cr17 (440C、440F)	675 ~ 760 98HRB ~ 23HRC	845 ~ 900 98HRB ~ 25HRC	同 440A	25HRC

① 从该温度空冷,在该温度的上限加热可获得最大的软度。

② 在所示范围内充分保温,炉冷至 790℃,以 15 ~ 20℃/h 连续冷到 595℃,空冷到室温;

③ 推荐充分利用这里的有利条件,可采用快冷到转变温度,并从转变温度空冷到室温;

④ 对于薄的零件、硬化的大截面零件、截面尺寸急剧变化的零件或具有尖锐凹槽的零件、经矫直或强力磨削或机械加工的零件,推荐预热到退火温度范围内的温度,以避免开裂并使变形最小,特别是 420、431、440A、B、C 和 F 型钢。

表 7-28 双相不锈钢的退火温度(AISI)

UNS 号	牌 号	温度/℃
S32900	329.7-Mo	925 ~ 955
S31500	3RE60	975 ~ 1025
	SAF2205、AF22	1020 ~ 1100
	DP3	1065 ~ 1175
S32550	Ferralum 合金 225	1065 ~ 1175

注:从退火温度必须快冷,但也必须与变形的限制相适应。

表 7-29 奥氏体不锈钢的消除应力处理(AISI)

用途和希望的性能	规定的热处理 ^①		
	超低碳型不锈钢 如 304L、316L	稳定型不锈钢 如 318、321、347	不稳定型不锈钢 如 304、316
强烈应力腐蚀	A、B	B、A	②
中等应力腐蚀	A、B、C	B、A、C	C ^②
轻微应力腐蚀	A、B、C、E、F	B、A、C、E、F	C、F
仅消除峰值应力	F	F	F
没有应力腐蚀	不需要	不需要	不需要
晶间腐蚀	A、C ^③	A、C、B ^③	C
强烈成形之后消除应力	A、C	A、C	C
在成形操作中消除应力	A、B、C	B、A、C	C ^④
组织完好性 ^⑤	A、C、B	A、C、B	C
尺寸稳定	G	G	G

① 热处理工艺按照最佳顺序减少;A:1065 ~ 1120℃退火,慢冷。B:在 900℃消除应力,慢冷。C:在 1065 ~ 1120℃退火,F 淬火或快冷。D:在 900℃消除应力,淬火或快冷。E:在 480 ~ 650℃消除应力,慢冷。F:在低于 480℃消除应力,慢冷。G:在 205 ~ 480℃消除应力,慢冷(通常所用时间是每 25mm 厚度 4h);

② 为了获得最佳消除应力处理,推荐使用稳定化或超低碳不锈钢;

③ 在多数情况下不需要热处理,但是,在制造工艺中促使不锈钢敏化时,可以采用热处理;

④ 也可用 A、B、或 D 处理,当成形完成时随即进行 C 处理;

⑤ 在有严重制造应力并伴有高载荷下工作时,可能引起裂纹,也出现于重型部件焊接之后。

表 7-30 不锈钢的固溶化处理温度

钢 号	固溶加热温度/℃	冷却方式	钢 号	固溶加热温度/℃	冷却方式
1Cr18Ni9	1050 ~ 1100	水(130 ~ 180HBW)	00Cr17Ni14Mo3	1050 ~ 1100	水或空气
1Cr18Ni9Ti 0Cr18Ni9Ti	1050 ~ 1150	水(140 ~ 170HBW)	0Cr18Ni12Mo2Ti 1Cr18Ni12Mo2Ti	1000 ~ 1100	水
00Cr18Ni10	1050 ~ 1100	水或空气	0Cr18Ni12Mo3Ti 1Cr18Ni12Mo3Ti	1000 ~ 1100	水
0Cr18Ni9	1080 ~ 1100	水或空气	00Cr18Ni14Mo2Cu2	1050 ~ 1100	水或空气
2Cr18Ni9	1100 ~ 1150	水	0Cr18Ni18Mo2CuTi	1080 ~ 1100	水
1Cr18Ni11Nb	1000 ~ 1100	水	0Cr21Ni5Ti	950 ~ 1050	水或空气
2Cr13Mn9Ni4	1000 ~ 1150	水	1Cr21Ni5Ti	950 ~ 1050	水或空气
1Cr14Mn14Ni	1000 ~ 1150	水	1Cr18Mn10Ni5Mo3N	1100 ~ 1150	水
1Cr18Mn8Ni5N	1050 ~ 1100	水或空气	0Cr17Mn14Mo2N	1050 ~ 1080	水
2Cr15Mn15Ni2N	1000 ~ 1150	水	1Cr18Ni11Si4AlTi	950 ~ 1050	水
00Cr17Ni14Mo2	1050 ~ 1100	水或空气			

表 7-31 奥氏体不锈钢的退火工艺规范

钢 号	冷拉坯料软化处理		冷拉材中间退火	
	加热温度/℃	冷却方式	加热温度/℃	冷却方式
0Cr18Ni9 1Cr18Ni9	970	水	850	水
2Cr18Ni9	970	水	850	水
1Cr18Ni9Ti 0Cr18Ni9Ti	970	水	850	水
2Cr13Mn9Ni4	970	水	850	水
0Cr18Ni18Mo2CuTi	—	—	1050 ~ 1080	水

7.2 钢的淬火和回火工艺规范及性能(表 7-32 ~ 表 7-55)

表 7-32 常用结构钢(含渗碳钢)的淬火、回火规范

钢 号	淬 火			回 火		
	温度/℃	冷却介质	硬度 HRC	温度/℃	冷却介质	硬度 HRC
30	850 ~ 900	水	48 ~ 53	550 ~ 650	—	152 ~ 212HBW
35	850 ~ 900	水	48 ~ 55	480 ~ 550	—	28 ~ 32
40	830 ~ 850	水	53 ~ 58	480 ~ 520	—	28 ~ 32
45	820 ~ 840	水	55 ~ 60	500 ~ 540	—	28 ~ 32
50	810 ~ 830	水	58 ~ 63	500 ~ 560	—	30 ~ 35
55	800 ~ 820	水	60 ~ 65	550 ~ 580	—	28 ~ 32
20Mn	870 ~ 890	水	—	400 ~ 700	空气	—
30Mn	825 ~ 850	水	49 ~ 53	400 ~ 650	—	—
40Mn	840 ~ 860	水或油	52 ~ 58	600	—	235HBW

(续)

钢 号	淬 火			回 火		
	温度/℃	冷却介质	硬度 HRC	温度/℃	冷却介质	硬度 HRC
50Mn	820 ~ 840	水或油	60 ~ 64	550 ~ 600	—	28 ~ 33
20Mn2	850 ~ 910	水或油	—	400 ~ 600	—	—
30Mn2	820 ~ 840 840 ~ 880	水 油	—	400 ~ 600	水或油	—
35Mn2	830 ~ 850	油	52 ~ 57	500 ~ 550	—	25 ~ 32
40Mn2	830 ~ 850	油或水	54 ~ 59	550 ~ 600	—	300 ~ 230HBW
45Mn2	810 ~ 840	油或水	57 ~ 63	500 ~ 550	—	30 ~ 35
50Mn2	790 ~ 820	油	60 ~ 64	500 ~ 600	—	28 ~ 35
35SiMn	860 ~ 890	水或油	52 ~ 57	500 ~ 540	—	28 ~ 32
42SiMn	850 ~ 880	水或油	55 ~ 59	590	水	—
20MnV	870 ~ 900	水或油	—	400 ~ 600	水、油或空气	—
42Mn2V	850 ~ 870	油或水	54 ~ 58	530 ~ 670	—	330 ~ 230HBW
35B	850 ~ 890	油	—	500 ~ 600	油或空气	—
40B	840 ~ 860	水或油	54 ~ 58	450 ~ 650	水或油	—
45B	830 ~ 850	水或油	54 ~ 60	500 ~ 600	水或油	30 ~ 36
50B	840 ~ 860	油	—	400 ~ 600	水或油	—
40MnB	820 ~ 860	油	—	450 ~ 500	水或油	30 ~ 40
45MnB	830 ~ 860	油	57 ~ 61	500 ~ 550	—	28 ~ 33
20Mn2B	860 ~ 880	油	—	200	空气	≥40
30Mn2B	840 ~ 880	油	—	400 ~ 500	水或油	—
35Mn2B	850 ~ 870	油或水	—	400 ~ 550	水或油	229 ~ 320HBW
45Mn2B	850 ~ 870	油或水	—	420 ~ 550	—	—
40MnMoB	840 ~ 870	油或水	—	450 ~ 600	油或水	—
40Mn2MoB	840 ~ 870	油	≥56	450 ~ 620	水或油	30 ~ 45
20MnVB	860 ~ 880	油	—	180 ~ 200	油或空气	—
40MnVB	840 ~ 870	水或油	54 ~ 59	500 ~ 560	油或空气	28 ~ 32
25MnTiB	830 ~ 870	油	—	180 ~ 200	空气	400HBW
40MnWB	850 ~ 880	油或水	—	400 ~ 650	油或水	240HBW
20SiMnVB	840 ~ 860	油	—	180 ~ 200	—	—
23SiMn2Mo	860 ~ 900	油	—	200 ~ 600	油或空气	—
24SiMnMoVA	860 ~ 870	油	—	180 ~ 200	—	—
25SiMnMoVA	900 ~ 930	油	—	630 ~ 660	油或水	302 ~ 248HBW
42Si2MnMoVA	860 ~ 900	油	—	250 ~ 390	油或水	—
20SiMn2MoVA	890 ~ 920	油或水	≥45	240 ~ 600	油或空气	—
25SiMn2MoVA	880 ~ 910	油或水	≥46	200 ~ 250	空气	≥45
27SiMn2MoVA	860 ~ 890	油	—	200 ~ 600	油、水或空气	—

(续)

钢 号	淬 火			回 火		
	温度/℃	冷却介质	硬度 HRC	温度/℃	冷却介质	硬度 HRC
30SiMn2MoVA	870 ~ 890	油	—	650 ~ 690	油或空气	280 ~ 340HBW
32Si2Mn2MoV	920	油	—	280 ~ 320	—	—
35SiMn2MoVA	860 ~ 890	油	—	220 ~ 450 640 ~ 660	油或空气	—
37SiMn2MoV	850 ~ 870	油	—	600 ~ 610	空气	—
30Mn2MoTiBA	870 ~ 900	油	—	200 ~ 280	油或空气	≥40
24MnMoVA	840 ~ 860	油	—	180 ~ 200	空气	—
42MnMoV	840 ~ 860	油	54 ~ 59	580 ~ 600	—	298 ~ 321HBW
37Si2MnCrNiMoV	920 ~ 930	油	—	270 ~ 280	—	—
15SiMn3MoA	870 ~ 900	空气或油	—	540 ~ 570	空气	300 ~ 350HBW
12SiMn2WVA	860 ~ 880	油	—	200	空气	—
37SiMn2MoWVA	860 ~ 900	油	≥57	650 ~ 680	空气	320 ~ 340HBW
15SiMn3MoWVA	880 ~ 900	空气	≤415	200 ~ 240	空气	400HBW
	880 ~ 900	空气	≤415	550	空气	300HBW
30Mn2MoWA	860 ~ 900	油或水	≥46	550 ~ 620	油或水	32 ~ 40
				200 ~ 300	油或空气	—
				450 ~ 500	油或空气	—
20Cr	860 ~ 880	油或水	—	450 ~ 480	油或空气	≤250HBW
30Cr	850 ~ 870	油或水	48 ~ 45	500 ~ 550	—	28 ~ 33
35Cr	850 ~ 870	油或水	51 ~ 56	520 ~ 550	—	28 ~ 33
40Cr	830 ~ 860	油	—	400 ~ 600	油或水	—
45Cr	830 ~ 850	油	56 ~ 61	560 ~ 580	—	28 ~ 33
50Cr	820 ~ 840	油	59 ~ 65	600 ~ 650	—	30 ~ 35
40CrV	850 ~ 880	油或水	54 ~ 58	450 ~ 500	—	35 ~ 42
38CrSi	880 ~ 920	油或水	—	250 ~ 680	空气、油或水	—
20CrMo	870 ~ 890	—	—	—	—	—
25CrMo	850	油或水	—	—	—	—
30CrMo	860 ~ 890	油或水	50 ~ 55	540 ~ 570	—	32 ~ 38
35CrMo	820 ~ 850	水或油	52 ~ 56	520 ~ 560	—	30 ~ 35
42CrMo	840 ~ 880	油	55 ~ 59	220 ~ 650	—	28 ~ 58
40CrMn	860 ~ 880	油	55 ~ 58	550 ~ 600	—	272 ~ 302HBW
40CrMnMo	840 ~ 860	油	54 ~ 59	630 ~ 650	油或水	30 ~ 35
18Cr2MnMoB	870 ~ 890	油	—	540 ~ 580	—	—
30CrMnTi	870 ~ 890	油	—	470 ~ 600	油或水	≥30
40CrMnTi	850 ~ 870	油	56 ~ 59	500 ~ 550	—	35 ~ 41
20CrMnSiA	880 ~ 910	油或水	—	200 ~ 550	油或水	—

(续)

钢 号	淬 火			回 火		
	温度/℃	冷却介质	硬度 HRC	温度/℃	冷却介质	硬度 HRC
25CrMnSiA	850 ~ 870 870 ~ 890	油 350℃盐浴	— 400HBW	260 ~ 550 —	油或水 —	— —
30CrMnSiA	860 ~ 880	油	—	260 ~ 550	油或水	—
35CrMnSiA	860 ~ 890 870 ~ 900	油 350℃盐浴	— ≤500HBW	200 ~ 550 —	油 —	— —
30CrMnSiNi2A	880 ~ 900	油	≥50	240 ~ 330	空气或油	≥45
40CrNi	840 ~ 860	油	54 ~ 59	500 ~ 590	—	30 ~ 35
45CrNi	810 ~ 830	油	56 ~ 61	560 ~ 600	—	25 ~ 30
50CrNiA	800 ~ 820	油	59 ~ 65	440 ~ 460	—	35 ~ 38
12CrNi2A	850 ~ 870	—	—	—	—	—
12CrNi3A	860	油	—	—	—	—
20CrNi3A	820 ~ 860	油	—	200 ~ 260 和 450 ~ 600	油或水	—
30CrNi3A	820 ~ 840	油	50 ~ 54	550 ~ 650	水或油	23 ~ 28
37CrNi3	850 ~ 860	油	51 ~ 57	650 ~ 670	水	30 ~ 35
12Cr2Ni4A	860	油	—	400 ~ 600 (200 ~ 250)	空气、油或水	—
20Cr2Ni4A	840 ~ 860	油	—	500 ~ 630	油或水	—
20CrNiMo	840 ~ 880	油	—	150 ~ 200	空气或油	—
40CrNiMoA	840 ~ 860	油	55 ~ 59	640 ~ 760	空气	28 ~ 32
34CrNi3Mo	850 ~ 870	油	—	550 ~ 640	—	—
45CrNiMoVA	870 ~ 900	油	—	250 ~ 430 390 ~ 470 500 ~ 650	油或空气	— 388 ~ 495HBW —
30CrNi2MoVA	850 ~ 880 850 ~ 880 850 ~ 880	油 180 ~ 200 300 ~ 320	— — —	200 ~ 280 240 ~ 260 240 ~ 260	空气或油 空气 空气	≥46 ≥47 ≥45
38CrMoAlA	930 ~ 950	油	—	600 ~ 680	水或油	350HBW
30CrMnMoTiA	850 ~ 890	油	—	200	空气	≥45
30CrMnSiNi2MoA	890 ~ 910 900	油 250 ~ 320	≥50 —	230 ~ 350 250 ~ 350	空气或油 空气	≥45 ≥440HBW
12Cr2Mn2SiMoV	940 ~ 980	空气	—	200 ~ 600	空气	300 ~ 375HBW
20Ni4Mo	830	油	—	150 ~ 200	空气	—
34CrNi1Mo	830 ~ 850	—	—	530 ~ 570	—	—

表 7-33 常用结构钢淬火临界直径

(单位:mm)

钢 号	淬火介质				钢 号	淬火介质			
	静 油	20℃ 水	40℃ 水	20℃ 5% w NaCl 水溶液		静 油	20℃ 水	40℃ 水	20℃ 5% w NaCl 水溶液
15	2	7	5	7	20MnVB	15	28	24	29
20	3	8	6	8	15Cr	8	17	14	18
25	6	13	10	13.5	20Cr	10	20	16	21.5
30	7	15	12	16	30Cr	15	28	24	29
35	9	18	15	19	35Cr	18	33	28	34
40	9	18	15	19	40Cr	22	38	35	40
45	10	20	16	21.5	45Cr	25	42	38	43
50	10	20	16	21.5	50Cr	28	45	41	46
55	10	20	16	21.5	20CrV	8	17	14	18
20Mn	15	28	24	29	40CrV	17	31	26	32
30Mn	15	28	24	29	20CrMo	8	17	14	18
40Mn	16	29	25	30	30CrMo	15	28	24	29
50Mn	17	31	26	32	35CrMo	25	42	38	43
20Mn2	15	28	24	29	42CrMo	40	58	54.5	59
35Mn2	20	36	31.5	37	25Cr2MoV	35	52	50	54
40Mn2	25	43			15CrMn	35	52	50	54
45Mn2	25	42	38	43	20CrMn	50	71	68	74
50Mn2	28	45	41	46	40CrMn	60	81	74	82
35SiMn	25	42	38	43	20CrMnMo	25	42	38	43
42SiMn	25	42	38	43	40CrMnMo	40	58	54.5	59
25Mn2V	18	33	28	34	30CrMnTi	18	33	28	34
42Mn2V	25	42	38	43	20CrNi	19	34	29	35
40B	10	20	16	21.5	40CrNi	24	41	37	42
45B	10	20	16	21.5	45CrNi	85	> 100	> 100	> 100
40MnB	18	33	28	34	12Cr2Ni4A	36	56	52	57
45MnB	18	33	28	34	40CrNiMoA	22.5	39	35.5	41
20Mn2B	15	28	24	29	38CrMoAlA	47	69	65	70

表 7-34 常用结构钢淬火及回火后的硬度

钢 号	淬火		不同温度回火后的硬度 HRC							
	温度/℃	硬度 HRC	150℃	200℃	300℃	400℃	500℃	550℃	600℃	650℃
30	860	43 ~ 44	43	42	40	30	20	18		
35	860	49 ~ 50	49	48	43	35	26	22	20	
40	840	54 ~ 55	55	53	48	42	34	29	23	20
45	840	58 ~ 59	58	55	50	41	33	26	22	

(续)

钢 号	淬火		不同温度回火后的硬度 HRC							
	温度/℃	硬度 HRC	150℃	200℃	300℃	400℃	500℃	550℃	600℃	650℃
50	830	58 ~ 59	58	55	50	41	33	26	22	
55	820	62 ~ 63	63	56	50	45	34	30	24	21
40Mn2	830	57 ~ 58	58	56	48	41	33	29	25	23
35SiMn	880	> 55	55	53	49	40	31	27	23	20
40MnMo	830	> 53	53	52	47	40	31	27	24	22
42Mn2V	850	> 57	57	55	51	47	35	30	25	21
50CrNi	830	53 ~ 60	52	50	46	41	35	31	27	23
40CrNiMoA	850	> 55	55	54	49	44	38	34	30	27
37CrNi3	860	> 53	53	51	47	42	36	33	30	25
35CrSi	870	> 53	53	51	47	42	36	33	30	25
37CrSi	900	57 ~ 60	57	56	54	48	40	37	35	29
35CrMn2	880	> 52	52	51	47	43	35	31	27	25
40Cr	850	> 55	55	53	51	43	34	32	28	24
40CrMnMo	850	> 57	57	55	50	45	41	37	33	30
35CrMoV	880	> 50	50	49	47	43	39	37	33	25
38CrMoAl	940	> 56	56	55	51	45	39	35	31	20
35CrMo	850	> 55	55	53	51	43	34	32	28	24
40CrNi	840	> 53	53	50	47	42	33	29	26	23
30CrMnSi	880	> 55	55	54	49	44	38	34	30	27
18CrMnTi	880	42 ~ 46	43	41	40	39	35	30	25	17
12CrNi3A	860	35 ~ 43	43	42	41	39	31	28	24	20
18CrNiW	850	44 ~ 46	45	43	42	41	37	32	27	19

表 7-35 常用结构钢淬火、回火工艺参数及力学性能

钢 号	淬火		回火		力学性能(\geq)					HBW \leq
	温度/℃	冷却	温度/℃	冷却	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ (%)	ψ (%)	a_K / $J \cdot cm^{-2}$	
45	820 ~ 840	水	180 ~ 200		1300	1150	6	22	15 ~ 25	50HRC
	820 ~ 840	水	560 ~ 620		700 ~ 850	450 ~ 560	15 ~ 17	45 ~ 50	60 ~ 80	196 ~ 241
10Mn2	900	空气	—	—	480	270	25	55	—	179
15Mn2	900	空气	—	—	530	310	23	50	60	179
20Mn2	850	油	200	水	800	600	10	40	60	187
30Mn2	840	水	500	水	750	600	12	45	80	207
35Mn2	840	水	500	水	850	700	12	45	70	207
	850	水	520	水	915	765	15	56	80	—
	830	水	570	水	980	912	17	61	152	300
40Mn2	840	水	550	水	850	700	12	45	70	217
	840	水	520	水	1000	800	10	45	60	—
	860	水	560	水	940	800	15	52	90	—

(续)

钢 号	淬火		回火		力学性能(\geq)					HBW \leq
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷却	温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷却	σ_b/MPa	σ_s/MPa	$\delta(\%)$	$\psi(\%)$	$a_K/\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$	
45Mn2	840	油	550	水或油	900	750	10	45	60	217
50Mn2	820	油	550	水或油	950	800	9	40	50	229
	820	油	530	水	960	870	12	40	50	—
	830	油	550	水	980	840	14	46	50	—
27SiMn	920	水	420	水或油	1000	850	12	40	50	217
35SiMn	900	水	550	水	1067	992	16	51	86	—
	900	水	600	水	940	817	22	59	136	—
	900	水	590	水或油	900	750	15	45	60	229
	890	水	570	水	920	750	15	51	90	—
42SiMn	880	水	590	水	900	750	15	40	60	229
	870	水	630	水	930	800	16	52	80	—
15MnV	880	油或水	200	水或空气	750	500	11	45	70	
20MnV	880	油	220	空气或油	850	650	14	50	10	187
25Mn2V	900	油	650	水	750	600	15	50	100	207
42Mn2V	860	油	600	水	1000	850	11	45	60	217
	860	油	570	油	1100	970	13	55	64	—
40B	840	水	550	水	800	650	12	45	70	207
45B	840	水	550	水	850	700	12	45	60	—
50B	860	水	600	空气	800	550	10	45	50	217
	860	油	580	空气	800	550	10	45	65	—
40MnB	850	油	500	水或油	1000	800	10	45	60	207
45MnB	840	油	500	水或油	1050	850	9	40	50	217
20Mn2B	880	油	200	空气或油	1000	800	9	45	70	187
45Mn2B	840	油	520	水或油	1000	850	9	40	50	—
	860	油	510 ~ 540	水	1075	920	13	46	70	—
15MnVB	860	油	200	水或空气	900	650	10	45	70	—
20MnVB	880	油	200	空气或油	1100	900	9	45	70	207
40MnVB	850	油	500	水或油	1050	850	10	45	70	207
20Mn2VB	860	油	200	水或油	1100	900	10	45	70	—
25MnTiB	850	油	200	水或空气	1400	1100	10	40	60	—
20Mn2TiB	860	油	200	水或空气	1150	950	10	45	70	—
40MnWB	870	油	500	油或水	1000	800	10	45	70	—
	860	油	510	水	1155	1010	13	51	73	—
20MnMoB	880	油	200	空气或油	1100	900	10	50	80	207
40MnMoB	860	油	500	水或油	1000	800	10	45	70	—

(续)

钢 号	淬火		回火		力学性能(\geq)					HBW \leq
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷却	温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷却	σ_b/MPa	σ_s/MPa	$\delta(\%)$	$\psi(\%)$	$a_K/\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$	
40Mn2MoB	850	油	560 ~ 590	水	1100	950	10	45	70	—
	870	油	550 ~ 570	空气	1110	1030	13	45	65	—
20Mn2MoB	880	油	200	空气或油	1100	900	10	50	80	—
20SiMnVB	910	油	200	空气或油	1200	1000	10	45	70	207
23SiMn2Mo	900	油	200	空气	1200	1000	10	45	60	—
24SiMnMoVA	850	油	200	空气	1200	1000	9	45	80	—
25SiMnMoVA	900	油	650	油	1000	900	10	45	70	187
42Si2MnMoVA	880	油	370	空气	1500	1350	7	35	40	—
	860	油	420	水	1715	1499	10	41	55	—
35Si2Mn2MoV	920	油	250	—	1700	—	9	40	50	—
20SiMn2MoVA	900	油	200	空气	1400	—	10	45	70	—
25SiMn2MoVA	900	油	200	空气	1500	1380	10	40	60	—
27SiMn2MoVA	860 ~ 890	油	550 ~ 570	油	1100	850	10	45	50	—
	890	油	570	油	1175	1050	13	48	37	—
	870	油	550	油	1190	1090	14	56	77	340
30SiMn2MoV	870	油	650	—	900	800	12	50	90	—
32Si2Mn2MoV	920	油	280 ~ 320	—	1700	1400	8	35	50	—
35SiMn2MoVA	870	水或油	650	水或空气	1000	850	12	50	80	—
	870	油	630	水	1170	1035	11	52	103	—
30Mn2MoTiBA	870	油	200	空气	1550	1350	9	45	60	—
24MnMoVA	860	油	200	空气	1400	1200	9	45	60	—
	870	油	200	空气	1585	1420	9	50	81	—
	840	油	200	空气	1660	1400	11	51	90	—
37Si2MnCrNiMoV	920 ~ 930	油	270 ~ 280	—	1850	1600	7	30	50	—
15SiMn3Mo	870	油	200	—	1200	900	10	45	100	—
12SiMn2WV	860	油	200	水或油	1000	850	12	45	100	—
16SiMn2WV	860	油	200	水或油	1200	900	10	45	80	—
37SiMn2MoWVA	900	水-油	650	水或空气	1000	850	12	45	70	—
15SiMn3MoWVA	880	空气	200	空气	1200	900	10	45	100	—
30Mn2MoWA	900	油	610	水或油	1000	850	12	50	90	—
15Cr	880, 800	水或油	200	水或空气	750	500	11	45	70	—
20Cr	880, 800	水或油	200	—	850	550	10	40	60	—
30Cr	860	油	500	水或油	900	700	11	45	60	187
40Cr	850	油	500	水或油	1000	800	9	45	60	207
45Cr	840	油	520	水或油	105	850	9	40	50	217
50Cr	830	油	500	水或油	1100	950	9	40	50	229

(续)

钢 号	淬火		回火		力学性能(\geq)					HBW \leq
	温度/℃	冷却	温度/℃	冷却	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ (%)	ψ (%)	a_K / $J \cdot cm^{-2}$	
10CrV	870	空气	550	空气或油	480	300	21	55	100	156
20CrV	800	水或油	180	空气或油	850	700	13	50	80	197
40CrV	880	油	650	水或油	900	750	10	50	90	241
45CrV	860	油	600	水或油	1000	800	10	45	80	255
50CrVA	860	油	520	水或油	1300	1150	10	45	40	255
35Cr2V	880	油	600	空气或油	750	600	16	40	50	241
38CrSi	900	油	600	水或油	1000	850	12	50	70	255
40CrSi	900	油	540	油	1250	1050	12	40	50	255
12CrMo	900	空气	650	空气	420	270	24	60	140	156
15CrMo	900	空气	650	空气	450	300	22	60	120	156
20CrMo	880	水或油	500	水或油	800	600	12	50	90	199
25CrMo	890	油	600	水或油	800	600	14	50	70	217
30CrMo	880	油或水	540	水或油	950	800	12	45	80	229
35CrMo	850	油	560	水或油	1000	850	12	45	80	241
42CrMo	850	油	600	水或油	1100	950	12	45	80	217
15CrMnMo	860	油	190	空气	950	700	11	50	90	197
20CrMnMo	850	油	200	空气或水	1200	900	10	45	70	—
22CrMnMo	850	油	190	空气	1100	900	10	45	80	217
25CrMnMo	940	空气或油	660	水或油	650	450	15	—	40	241
40CrMnMo	850	油	600	水或油	1000	800	10	45	90	241
20CrMnTi	870	油	500	水或油	1000	800	9	45	60	207
30CrMnTi	850	油	550	水或油	1000	800	11	45	80	241
40CrMnTi	860	油	620	水或油	1100	1000	12	45	60	241
20CrMnSiA	880	油	180	空气或油	900	750	10	45	60	187
25CrMnSiA	860	油	600	水或油	850	700	12	45	80	229
	880	油	450	水或油	1100	900	10	40	50	—
30CrMnSiA	840	油	520	水或油	1000	850	9	45	60	229
35CrMnSiA	850	油	490	—	1300	1100	5	35	—	—
30CrMnSiNi2A	850	油	520	—	1300	1200	6	35	35	—
	900	油	250	空气	1600	1280	9	40	60	—
15CrMn2SiMoA	880	油	500	水或油	800	600	10	40	60	207
	860	油	200	水或空气	1200	900	10	45	80	—
20CrNi	880	油	480	水或油	1100	950	10	40	50	217
	850	水或油	460	水或油	800	600	10	50	80	—
40CrNi	880	油	540	水或油	1100	900	10	45	50	229
	820	油	500	水或油	1000	800	10	45	70	—

(续)

钢 号	淬火		回火		力学性能(\geq)					HBW \leq
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷却	温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷却	σ_b/MPa	σ_s/MPa	$\delta(\%)$	$\psi(\%)$	$a_K/\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$	
45CrNi	880	油	230	—	1650	—	9	40	50	—
	820	油	530	水或油	1000	800	10	45	70	—
	850	油	640	水	860	635	11	50	63	—
50CrNiA	890	油	230	空气或油	1650	1300	9	40	50	229
12CrNi2A	900	油	250	—	1600	—	9	40	60	—
	780	水	200	水或空气	800	600	12	50	80	—
12CrNi3A	860 + 780	油	200	水或空气	950	700	11	50	90	—
20CrNi3A	850	油	200	水或油	1450	1300	9	45	60	229
30CrNi3A	820	油	500	水或油	1000	800	9	45	80	229
37CrNi3	870	油	200	水或油	1000	800	10	50	80	217
12Cr2Ni4	860 + 780	油	200	水或空气	1100	850	10	50	90	—
	920 → 820	油	200	—	1350	1260	14	65	100	37HRC
20CrNiMo	870	油	420	—	1800	1600	5	20	30	—
20Cr2Ni4A	880	油	600	空气	800	600	15	45	60	229
	880 + 780	油	200	空气	1200	1100	10	45	80	—
	860	油	180	—	1400	1200	9	45	80	—
18Cr2Ni4WA	850	油	200	空气	1200	850	10	45	100	—
	820	油	480	空气	1000	800	8	30	30	—
40CrNiMoA	850	油	400	—	1900	1700	5	20	30	—
	850	油	600	水或油	1000	850	12	55	100	—
45CrNiMoVA	870	油	410	油	1560	1390	10	40	45	—
34CrNi3Mo	860	油	590	—	1100	1000	12	50	80	—
	850	油	420	—	1900	1700	5	20	30	—
30CrNi2MoVA	880	空气	630	空气	400	250	25	60	120	149
	860	油	650	水或油	900	800	12	50	90	—
38CrAlA	930	油或水	630	水或油	950	800	12	50	80	217
38CrMoAlA	940	油或水	640	水或油	1000	850	15	50	90	229
25CrMnMoTiBA	860	油	150 ~ 200	空气	1200	1100	10	45	80	—
30CrMnMoTiA	870	油	200	空气	1550	1350	9	45	60	—
30CrMnSiNi2MoA	900	油	250	空气	1600	1410	9	40	60	—
12Cr2Mn2SiMoV	940	空气	250	空气	1200	900	10	45	90	—
20Ni4Mo	830 ~ 860	油	200	空气	1100	850	10	40	80	—
12Cr3MoA	880	空气	740	炉冷	500	300				
12CrMoV	970	空气	750	空气	450	230	22	50	10	156
12Cr1MoV	970	空气	750	空气	500	250	22	50	90	156
24CrMoV	900	油	600	水或油	800	600	14	50	60	255

(续)

钢 号	淬火		回火		力学性能(\geq)					HBW \leq
	温度/℃	冷却	温度/℃	冷却	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ (%)	ψ (%)	a_k / $J \cdot cm^{-2}$	
35CrMoV	900	油	630	水或油	1100	950	10	50	90	229
25Cr2MoVA	900	油	620	空气	950	800	14	55	80	241
25Cr2Mo1VA	1040	空气	670	—	750	600	6	50	60	—
30Cr2MoV	860	油	600	—	1250	1050	9	35	90	269
40Cr2MoV	860	油	600	油	1150	950	10	45	60	169
30CrSiMoV	840	油	650	水或油	700	600	15		60	255
38CrWVA1A	930	油或水	640	水或油	1000	850	15	50	90	229
15CrMn2SiMo	860	油	200	—	1200	900	10	45	80	—
20CrMnB	870	油	200	空气或油	1000	800	9	50	80	197
20CrMnMoVBA	900	油	200	空气或油	1200	1000	10	50	80	217

表 7-36 常用调质钢的热处理规范

钢 号	锻件(铸件)的预备热处理			最终热处理				
	正火或淬火/℃	回火/℃	硬度 HBW	淬火/℃	冷却剂	回火/℃	冷却剂	硬度 HRC
35	正火: 850 ~ 870	—	187	840 ~ 850	水	540 ~ 580		20 ~ 26
	900 ~ 950	—	137 ~ 197					
	淬火: 840 ~ 850(水)	600 ~ 630	241 ~ 207					
		540 ~ 580	228 ~ 269					
40	正火: 840 ~ 860	—	约 207	830 ~ 850	水	300 ~ 400		47 ~ 40
	900 ~ 950		163 ~ 167			400 ~ 450		44 ~ 35
	淬火: 830 ~ 850(水)	540 ~ 580	228 ~ 203			510 ~ 550		30 ~ 22
		580 ~ 640	228 ~ 192			540 ~ 580		228 ~ 203HBW
		640 ~ 680	195 ~ 170			580 ~ 640		203 ~ 192HBW
45	正火: 850 ~ 870		约 217	810 ~ 830	水 油	510 ~ 560 560 ~ 600		30 ~ 20
	淬火: 820 ~ 840(水)	540 ~ 580	269 ~ 228	840 ~ 850				235 ~ 192HBW
		580 ~ 640	228 ~ 192					
		640 ~ 680	192 ~ 170					
50	正火: 820 ~ 840		约 228	820 ~ 840	水	590 ~ 620		约 20
	完全退火: 820 ~ 840		179 ~ 228			450		约 28
	正火: 840 ~ 860	600	约 228			550		约 24
	淬火: 840 ~ 860	590 ~ 620	约 248			660		约 20
		620 ~ 660	约 228					
60	完全退火: 800 ~ 820			820 ~ 840	油或水	550 ~ 620		241 ~ 207HBW
	正火: 800 ~ 820		187 ~ 228			400		约 35
	820 ~ 840	600 ~ 640	约 228			500		约 30
	淬火: 820 ~ 840(水或油)	520 ~ 560	286 ~ 248			600		约 20
		620 ~ 660	约 228					

(续)

钢 号	锻件(铸件)的预备热处理			最终热处理				
	正火或淬火/℃	回火/℃	硬度 HBW	淬火/℃	冷却剂	回火/℃	冷却剂	硬度 HRC
85	完全退火:800~820			790~810	油或水	340~380		47~54
	正火:760~800	650~680	约 228			480~520		48~38
	淬火:790~810(水或油)	480~520	351~460			520~580		43~30
		520~580	351~286			560~600		33~26
		580~600	286~255					
50Mn 和 60Mn	正火:820~840		约 241	820~830	油	550~650		
	840~860	640~680	约 241			400		约 35
	完全退火:820~840		179~228			500		约 24
	淬火:830~850	560~580	228~207	800~820	油	600		约 20
		580~620	约 228			480~530		35~28
	完全退火:775~800		约 228			560~680		约 20
65Mn	完全退火:775~800		约 228	790~810	油	280~320		54~47
	正火:830~850							
	淬火:830~850(油)	610~670	约 228					
35Mn2	完全退火:770~790		约 179	800~820	水	620~640	水	35
	正火:840~860		约 241	820~840	水	550~620		约 22
	淬火:800~820(水)	540~560	约 269			450		约 34
45Mn2	完全退火:770~800		约 187	830~850	油	620~640		33~20
	正火:830~850		约 241			300		47
			约 269			400		43
		550~600				500		35
	淬火:830~850(油)							
40Cr 和 38Cr	退火:891~910		156~202	850~870	油	425	水	约 39
	正火:850~870		≤ 207			540	水	约 32
	850	660	≤ 179			650	水	约 20
	淬火:840~860	580~620	255~235	850	水	550~580	水	20~24
		620~680	235~202			600~620	水	196~219HBW
						180~200		48~56
45Cr	正火:840~860		≤ 229	840	油	485	水	33~39
						580~620	水	25~30
						600~650	水	≤ 22
25SiMn 和 35SiMn	正火:930		187~209	920	水	230		45~43
	930	600	约 163			475		33~39
	淬火:910~930(水)	580~620	228~163			680		20~25
40SiCr	退火:880		241~269	900~920	水或油	450~500		37~44
	正火:900	660	241~269			560~610		28~35
		600~650	302~255	880~900	水或油	600~650		25~33
		630~680	285~241			250~280		47
						430~470		38~43
						580~620		33~37
						650~690		30~20

(续)

钢 号	锻件(铸件)的预备热处理			最终热处理				
	正火或淬火/℃	回火/℃	硬度 HBW	淬火/℃	冷却剂	回火/℃	冷却剂	硬度 HRC
40CrNi	退火:840~850 840~860		≤207 156~207	820~840	油	550~600	水	25~30
35CrMo	退火:890~910 正火:880 淬火:850(水)	600~640	163~207 241~285 207~241	850~870 850	油或水 水	600~640 550~560	水或油 空气	≥20 22~30
35CrMn2	正火:870	—	约241	840	油	620~640	水	20~28
20CrMnSi	正火:880~900	—	约241	880	油	500~520	水	≥20
30CrMnSi	正火:860~880	—	约241	870	油	640~660	水	≥21
35CrMnSi	完全退火:890~910 球化退火:780 等温退火:700~850 正火:890~910 890~910 淬火:930~950(油)	— — — — 700~740 600~660 650~700	179~255 197 187~207 ≤218 228~196 280~302 217~265	860~880	油	500~550	水或油	≥21

表 7-37 一些常用渗碳钢的热处理规范

钢 号	预备热处理(锻件)	渗碳温度 /℃	最终热处理			硬度 HRC	
			第一次淬火 /℃	第二次淬火 /℃	回火 /℃	表面	中心
10	正火:920~940℃ ≤130HBW	900~920℃	790(水)		150~180	≥56	≤30
15	正火:900~920℃ ≤143HBW		790(水)		150~180	≥56	≤30
20	正火:880~900℃ ≤156HBW		790(水)		150~180	≥56	≤30
15Cr	正火:880~900℃ ≤179HBW		780~800(水)		180~200	58~63	20~32
20Cr	正火:860~880℃ ≤207HBW		850~870(水、油)	780~800(水)	180~200	58~62	20~32
20CrNi	正火:860~880℃ ≤207HBW		830~850(油)		180~200	58~62	23~32
12CrNi2	正火:885~940℃ 156~228HBW		760~780(油)		180~200	≥58	23~28
20CrNi3	正火:885~940℃ 156~228HBW		760~780(油)		150~180	≥58	26~40
20Cr2Ni4	正火:950~970℃ ≤269HBW 回火:640~650℃		820(油)		200	≥60	35~45
12Cr2Ni4	正火:885~940℃ 156~228HBW		600~650(回火)	800(油)	180	≥60	35~45
18CrNiW	正火:920~950℃ ≤269HBW 回火:640~660℃		760~780(油)		150~170	≥58	35~47
18CrNiMo	正火:950℃ 197~269HBW 回火:650℃		760~780(油)		150~170	≥58	35~47
18CrMnMo	正火:880~900℃ ≤163HBW 回火:550~660℃		780~800(油)		180~200	≥58	35~47
18CrMnTi	正火:900~920℃ ≤163HBW 回火:600℃		800~820(油)		180~200	≥58	35~47
20Cr3	正火:800~880℃ ≤207HBW		800~820(油)		180~200	≥58	35~45
18CrMnA	正火:850~870℃ ≤163HBW		820(油)		180~200	≥58	26~40
30CrMnTi	正火:950~920℃ 170~228HBW		850(油)		150~180	56~60	38~44
15Cr2MnNiTiA	正火:950~920℃ 170~228HBW		850(油)		180~200	58~63	30~45

表 7-38 各种中强度渗碳轴的热处理工艺

零件名称	钢 号	预备热处理 /℃	渗碳温度 /℃	最终热处理			硬 度 HRC
				淬火温度/℃	冷却剂	回火/℃	
变速器的 变速轴	15	900 ~ 920	900 ~ 920	780 ~ 800	水	180 ~ 200	≥ 56
	20	880 ~ 900	900 ~ 910	780 ~ 810	水	180 ~ 200	≥ 56
	15Cr	880 ~ 900	900 ~ 920	760 ~ 780	水	200 ~ 220	58 ~ 63
变速器的主 轴和中间轴	20Cr	860 ~ 880	900 ~ 920	800 ~ 820	油	200 ~ 220	58 ~ 63
	20CrMnMo	880 ~ 900	920 ~ 940	810 ~ 830	油	210 ~ 230	56 ~ 60
	20CrMnTi	950 ~ 970	920 ~ 940	830 ~ 850	油	200 ~ 220	≥ 56

表 7-39 常用弹簧钢的淬火、回火规范

钢 号	淬 火			回 火		
	温度/℃	冷却介质	硬度 HRC	温度/℃	冷却介质	硬度 HRC
60	800 ~ 820	水	—	380 ~ 450	—	40 ~ 450
65	790 ~ 810	水	—	400 ~ 500	—	37 ~ 45
	820 ~ 830	油	—	400 ~ 500	—	37 ~ 45
70	820	油	—	380	—	269HBW
75	780 ~ 820	水或油	—	380	—	39 ~ 46
85	780 ~ 820	水或油	—	375 ~ 400	—	40 ~ 49
60Mn	820 ~ 840	油或水	—	380 ~ 420	—	40 ~ 45
65Mn	780 ~ 840	油或水	—	380 ~ 400	水	45 ~ 50
50CrVA	850 ~ 890	油	—	400 ~ 500	—	42 ~ 47
50CrMn	840 ~ 860	油	—	400 ~ 510	水	40 ~ 45
50CrMnV	820 ~ 840	水	—	550	—	39 ~ 43
	840 ~ 880	油	—	550	—	39 ~ 43
45CrMoV	930 ~ 960	油	—	530 ~ 600	空气或水	—
55Si2	880	油	—	480	水	39 ~ 43
60Si2	870	油	—	460	水	43 ~ 50
60Si2A	870	油	—	460	水	40 ~ 49
63Si2A	860	油	—	480	水	302HBW
70Si3A	860	油	—	460	水	302HBW
60Si2CrA	850	油	—	400	水	—
60Si2CrV	850	油	—	400	水	—
55SiMn	880	油	—	460	水	39 ~ 46
55Si2Mn	850 ~ 880	油或水	—	400 ~ 520	空气	—
60Si2Mn	840 ~ 880	油或水	—	410 ~ 460	水	45 ~ 50
70Si3Mn	860	油	—	420 ~ 480	—	48 ~ 52
55SiMnVB	840 ~ 880	油	—	400 ~ 500	水或空气	40 ~ 47
55SiMnMoV	860 ~ 900	油	—	520 ~ 580	—	40 ~ 45
55SiMnMoVNb	860 ~ 900	油	—	450 ~ 550	水或空气	—
30W4Cr2VA	1050 ~ 1100	油	—	600 ~ 670	空气或水	—

表 7-40 常用弹簧钢淬火工艺参数及回火后的硬度

钢 号	淬火		不同温度回火后的硬度 HRC							
	温度/℃	硬度 HRC	150℃	200℃	300℃	400℃	500℃	550℃	600℃	650℃
60	820	62 ~ 63	63	56	50	45	34	30	24	21
65	800	62 ~ 63	63	58	50	45	37	32	28	24
70	800	62 ~ 63	63	58	50	45	37	32	28	24
80	800	62 ~ 63	63	61	52	47	39	32	28	24
65Mn	810	57 ~ 64	61	58	54	47	39	34	29	25
60Mn	810	57 ~ 64	61	58	54	47	39	34	29	25
60Si2Mn	870	> 60	61	60	56	51	43	38	33	29
50CrV	860	56 ~ 62	56	55	51	45	39	35	31	28

表 7-41 常用弹簧钢淬火临界直径 (单位: mm)

钢 号	淬火介质				钢 号	淬火介质			
	静 油	20℃ 水	40℃ 水	20℃ 5% NaCl 水溶液		静 油	20℃ 水	40℃ 水	20℃ 5% NaCl 水溶液
60	12	24	19.5	25.5	65Mn	20	36	31.5	37
65	12	24	19.5	26	50CrVA	32	51	47	52
75	13	25	20.5	27	50CrMn	36	56	52	57
85	14	26	22	28	50CrMnV	36	56	52	57
60Mn	20	36	31.5	37	60Si2Mn	22	38	35	40

表 7-42 常用弹簧钢淬火、回火工艺参数及力学性能

钢 号	淬 火		回火温度 /℃	力学性能(≥)				
	温度/℃	冷却		σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ (%)	ψ (%)	a_K / $J \cdot cm^{-2}$
60	880	—	150	2200	—	—	34	—
65	840	油	480	1000	800	9	35	—
75	820	油	480	1100	900	7	30	—
85	820	油	480	1150	1000	6	30	—
65Mn	830	油	480	1000	800	8	30	—
50CrVA	850	油	500	1300	1150	10	40	—
50CrMn	840	油	490	1300	1000	5	35	—
45CrMoV	950	油	550	1400	1200	8	39	48
55Si2Mn	870	水或油	480	1200	1100	6	30	30
60SiMn	860	油	460	1300	1200	5	25	25
60Si2Mn	870	油	460	1300	1200	5	25	25
70Si3Mn	860	油	420	1800	1600	5	20	20
55SiMnVB	860	油	460	1400	1250	5	30	—
55SiMnMoV	880	油	550	1400	1300	6	30	—
55SiMnMoVNB	880	油	530	1400	1300	8	35	40
30W4Cr2VA	1030 ~ 1100	油	600	1500	1350	7	40	74

表 7-43 常用轴承钢的淬火、回火规范

钢 号	淬 火			回 火		
	温度/℃	冷却介质	硬度 HRC	温度/℃	冷却介质	硬度 HRC
GCr6	800 ~ 825	油或水	62 ~ 66	150 ~ 170	—	61 ~ 65
GCr9	815 ~ 830	油	≥ 63	150 ~ 170	空气	62 ~ 65
GCr15	835 ~ 850	油	≥ 63	150 ~ 170	空气	61 ~ 65
G8Cr15	830 ~ 850	油	—	150 ~ 160	空气	61 ~ 64
GCr9SiMn	800 ~ 840	油	63 ~ 65	150 ~ 170 200 ~ 250	— —	61 ~ 65 58 ~ 61
GCr15SiMn	820 ~ 840	油	—	150 ~ 180	空气	> 62
GSiMn(RE)	790	油	—	150 ~ 170	空气	61 ~ 64
GSiMnV(RE)	780 ~ 820	油	63 ~ 65	150 ~ 170	空气	62 ~ 63
GSiMnMoV(RE)	780 ~ 820	油	≥ 63	160 ~ 180	空气	62 ~ 64
GMnMoV(RE)	780 ~ 810	油	≥ 63	150 ~ 170	空气	62 ~ 63
GCrSiWV	870 ~ 890	油	—	300	空气	60 ~ 62
Cr4Mo4V	1100 ~ 1200	油	—	520 ~ 530 (3 次)	补充回火 350℃	> 62
Cr14Mo4V	1100 ~ 1120	油	—	500 ~ 525 (4 次)	空气	61 ~ 63
9Cr18Mo	1050 ~ 1100	油	—	150 ~ 160	空气	≥ 58
70Mn15Cr2Al3WMoV2	1180	水	—	650 ~ 700	空气	45 ~ 50

表 7-44 常用轴承钢淬火临界直径 (单位: mm)

钢 号	淬火介质			
	静 油	20℃ 水	40℃ 水	20℃ 5% w _{NaCl} 水溶液
GCr9	13	25	20.5	26
GCr15	15	28	24	29
GCr9SiMn	25	42	38	43
GCr15SiMn	29	46	42	47

表 7-45 常用轴承钢淬火工艺参数及回火后的硬度

钢号	淬 火		不同温度回火后的硬度 HRC							
	温度/℃	硬度 HRC	150℃	200℃	300℃	400℃	500℃	550℃	600℃	650℃
GCr6	820	> 62	62	61	56	48	37	33	30	27
GCr9	840	65	62	61	56	48	37	33	30	27
GCr15	860	62 ~ 66	64	61	55	49	41	36	31	28

表 7-46 几种轴承钢在淬火回火状态下的力学性能

钢 号	硬度 HRC	抗弯强度/MPa	挠度/mm	冲击吸收功/J	热处理工艺
GSiMnV	62	2520	4.4	74	800℃ 油淬, 175℃ 回火
GSiMnVRE	65	2610	—	—	800℃ 油淬, 160℃ 回火
GSiMnMoV	61.7	2810	4.6	70	800℃ 油淬, 175℃ 回火
GMnMoV	—	—	—	88	805℃ 油淬, 150℃ 回火
GMnMoVRE	—	—	—	95	805℃ 油淬, 150℃ 回火
GCr15	62.9	2510	2.8	52	840℃ 油淬, 150℃ 回火

表 7-47 常用高速钢的淬火、回火规范

钢 号	淬火预热		淬火加热		回 火	硬度 HRC
	温度/℃	时间 /s·mm ⁻¹	温度/℃	时间 /s·mm ⁻¹		
W18Cr4V	850	24	1260 ~ 1300	12 ~ 15	560℃, 3 次	≥ 62
9W18Cr4V	850	24	1260 ~ 1280	12 ~ 15	570 ~ 590℃, 4 次	≥ 63
W18Cr4VCo5	850	—	1270 ~ 1310	—	560 ~ 590	≥ 63
W18Cr4VCo10	850	—	1280 ~ 1330	—	560 ~ 590	≥ 64
W18Cr4VSiNbAl	850	24	1230 ~ 1250	12 ~ 15	530 ~ 560℃, 4 次	≥ 65
W14Cr4VMnRe	850	24	1230 ~ 1260	12 ~ 15	560℃, 3 次	≥ 63
W12Cr4V4Mo	850	24	1240 ~ 1280	12 ~ 15	550 ~ 570℃, 3 次	≥ 62
W12Cr4V5Co5	800 ~ 850	24	1220 ~ 1245	12 ~ 15	530 ~ 550℃, 3 次	≥ 65
W12Mo3Cr4V3N	850	24	1220 ~ 1280	12 ~ 15	550 ~ 570℃, 4 次	≥ 65
W12Mo3Cr4V3Co5Si	850	24	1210 ~ 1240	12 ~ 15	560℃, 4 次	≥ 66
W10Mo4Cr4V3Al	860 ~ 880	40	1230 ~ 1250	20	540 ~ 560℃, 4 次	≥ 66
W10Mo4Cr4V3Co10	800 ~ 850	24	1200 ~ 1250	12 ~ 15	550 ~ 570℃, 3 次	≥ 66
W9Cr4V2	800 ~ 820	—	1220 ~ 1240	—	560 ~ 580℃	63 ~ 65
W6Mo5Cr4V2	850	24	1200 ~ 1240	12 ~ 15	560℃, 3 次	62 ~ 64
W6Mo5Cr4V3	850	24	1200 ~ 1230	12 ~ 15	550 ~ 570℃, 3 次	≥ 64
W6Mo5Cr4V2Al	850	24	1220 ~ 1240	12 ~ 15	550 ~ 570℃, 4 次	≥ 65
W6Mo5Cr4V2Co5	800 ~ 850	24	1210 ~ 1230	12 ~ 15	550 ~ 570℃, 3 次	≥ 64
W6Mo3Cr4V5Co5	800 ~ 850	24	1210 ~ 1230	12 ~ 15	540 ~ 560℃, 3 次	≥ 64
W6Mo4Cr4V5Co5	850	—	1190 ~ 1230	—	540 ~ 650℃	63 ~ 68
W6Mo5Cr4V5SiNbAl	850	24	1220 ~ 1240	12 ~ 15	560℃, 3 次	≥ 65
W2Mo8Cr4V	730 ~ 840	—	1180 ~ 1210	—	540 ~ 590℃	60 ~ 65
W2Mo9Cr4V2	800 ~ 850	24	1180 ~ 1230	12 ~ 15	550 ~ 580℃, 3 次	≥ 65
W2Mo9Cr4VCo8	850	24	1180 ~ 1220	12 ~ 15	550 ~ 570℃, 4 次	≥ 66
W2Mo10Cr4VCo5	820 ~ 850	—	1180 ~ 1200	—	510 ~ 590℃	65 ~ 70
W2Mo10Cr4VCo8	730 ~ 840	—	1100 ~ 1225	—	540 ~ 570℃	65 ~ 70
FW12Cr4V5Co5	850	24	1230 ~ 1260	12 ~ 15	520 ~ 540℃, 3 ~ 4 次(每次 2h)	≥ 65
FW10Mo5Cr4V2Co2	850	24	1170 ~ 1190	12 ~ 15	500 ~ 530℃, 3 ~ 4 次(每次 2h)	≥ 66

注: 1. 淬火加热介质均为中性盐浴。

2. 淬火介质均为油冷或空冷。

3. 回火每次 1h, 回火后均为空冷。

表 7-48 常用高速钢制作冷作模具的淬火、回火规范

钢 号	淬火预热		淬火加热			淬火 介质	回 火	硬度 HRC
	温度/℃	时间 /s·mm ⁻¹	介质	温度/℃	时间 /s·mm ⁻¹			
W18Cr4V	550 + 850	24	盐浴或电炉	1200 ~ 1240	15 ~ 20	油	560℃, 3 次, 每次 1h, 空冷	≥ 60
W6Mo5Cr4V2	550 + 850	24	盐浴或电炉	1150 ~ 1200	20	油	560℃, 3 次, 每次 1h, 空冷	≥ 60

表 7-49 几种高速钢的热硬性

钢 号	热处理制度	625℃加热 4h 后的硬度 HRC
W14Cr4VMnRE	1230℃油淬, 560℃回火 3 次, 每次 1h	58.7
	1240℃油淬, 560℃回火 3 次, 每次 1h	59.8
	1250℃油淬, 560℃回火 3 次, 每次 1h	61.3
	1260℃油淬, 560℃回火 3 次, 每次 1h	61.3
9W18Cr4V	1240℃油淬, 560℃回火 4 次	61.7
	1260℃油淬, 560℃回火 4 次	62.6
W6Mo5Cr4V2Al	1220℃油淬, 560℃回火 4 次, 每次 1h	61.0
	1240℃油淬, 560℃回火 4 次, 每次 1h	64.0
W10Mo4Cr4V3Al	1220℃油淬, 560℃回火 4 次, 每次 1h	63.0
	1240℃油淬, 560℃回火 4 次, 每次 1h	64.2
W6Mo5Cr4V5SiNbAl	1220℃油淬, 560℃回火 4 次, 每次 1h	57.8
	1240℃油淬, 560℃回火 4 次, 每次 1h	57.9
W12Mo3Cr4V3Co5Si	1220℃油淬, 560℃4 次回火, 每次 1h	58.7
	1240℃油淬, 560℃4 次回火, 每次 1h	62.2
W18Cr4V4SiNbAl	1220℃油淬, 560℃回火 4 次, 每次 1h	59.5
	1240℃油淬, 560℃回火 4 次, 每次 1h	60.0

表 7-50 常用工(冷)模具用钢的淬火、回火规范

钢 号	淬 火				回 火	
	预热温度/℃	加热温度/℃	淬火介质	硬度 HRC	温度/℃	硬度 HRC
T7、T7A	650	780 ~ 830	盐水、水	63 ~ 65	160 ~ 200	60 ~ 63
T8、T8A	600 ~ 650	730 ~ 750	水、盐水	63 ~ 65	150 ~ 220	63 ~ 57
T9、T9A	600 ~ 650	760 ~ 800	水、盐水	64 ~ 66	150 ~ 300	55 ~ 65
T10、T10A	565 ~ 600	760 ~ 780	水—油	64 ~ 66	150 ~ 250	58 ~ 63
T11、T11A	—	760 ~ 780	水、盐水	64 ~ 66	160 ~ 300	55 ~ 65
T12、T12A	—	760 ~ 780	水—油	64 ~ 66	160 ~ 250	58 ~ 63
T13	—	760 ~ 790	水	64 ~ 66	200 ~ 300	54 ~ 62
		780 ~ 810	油			
T8Mn	—	760 ~ 820	水	63 ~ 65	150 ~ 200	> 59
Cr	—	790 ~ 845	油或水	62 ~ 65	150 ~ 260	60 ~ 64
Cr06	—	780 ~ 800	水	62 ~ 65	200 ~ 300	55 ~ 62
		800 ~ 825	油	63 ~ 65	200 ~ 300	55 ~ 62
Cr2	—	790 ~ 840	油或水	64 ~ 66	150 ~ 320	56 ~ 64
9Cr2	—	820 ~ 850	油	61 ~ 63	160 ~ 180	59 ~ 61
8Cr3	—	850 ~ 880	油	≥ 55	480 ~ 520	41 ~ 46
Cr12	800 ~ 850	950 ~ 980	油	60	180 ~ 200	60 ~ 62
9Mn2	—	760 ~ 780	水	≥ 62	130 ~ 170	60 ~ 62
		770 ~ 800	油	62 ~ 64	150 ~ 300	56 ~ 62

(续)

钢 号	淬 火				回 火	
	预热温度/℃	加热温度/℃	淬火介质	硬度 HRC	温度/℃	硬度 HRC
V	—	770 ~ 820	水	63 ~ 66	150 ~ 200	≥ 63
8V	—	760 ~ 820	水	≥ 63	150 ~ 200	≥ 60
W	—	790 ~ 830	水	63 ~ 66	150 ~ 250	60 ~ 64
W2	—	790 ~ 830	油、水	≥ 62	150 ~ 200	≥ 62
SiCr	650 ~ 700	830 ~ 860	油	63 ~ 66	150 ~ 300	58 ~ 63
9SiCr	600 ~ 650	860 ~ 880	油	62 ~ 64	150 ~ 250	58 ~ 62
CrV	—	775 ~ 815 815 ~ 870	水 油	62 ~ 65	150 ~ 320	56 ~ 64
8CrV	—	790 ~ 840 850 ~ 860	水 油	62 ~ 64	160 ~ 250	54 ~ 63
9CrV	600 ~ 650	850 ~ 880 820 ~ 840	油 水	61 ~ 64	180 ~ 250	63 ~ 65
CrMn	—	820 ~ 840	油	64 ~ 66	150 ~ 200	60 ~ 62
CrW	650	790 ~ 830 840 ~ 880	水 油	62 ~ 66	160 ~ 260	58 ~ 64
5CrW	—	840 ~ 860	水或油	56 ~ 62	150 ~ 200	≥ 56
CrW5	—	800 ~ 820 820 ~ 860	水 油	64 ~ 67	180 ~ 200	≥ 63
Cr12W	800 ~ 850	940 ~ 970	油或空气	62	200 ~ 540	54 ~ 61
Cr12Mo	800 ~ 850	970 ~ 1010	油或空气	≥ 62	200 ~ 540	54 ~ 61
MnSi	—	780 ~ 800 800 ~ 840	水 油	62 ~ 65 62 ~ 64	150 ~ 400	56 ~ 64
8MnSi	—	770 ~ 800 800 ~ 820	水 油	≥ 60 ≥ 60	100 ~ 300	60 ~ 64
7MnSi2	—	810 ~ 850	油	58 ~ 64	300 ~ 500	40 ~ 52
5MnSi	—	820 ~ 850	油	58 ~ 62	300 ~ 500	43 ~ 54
55Si2Mn	—	870 ~ 920	油或水	60 ~ 64	175 ~ 425	50 ~ 60
9Mn2V	650	780 ~ 820	油	≥ 62	150 ~ 200	60 ~ 62
4CrW2Si	700 ~ 750	860 ~ 900	油	52 ~ 57	250 ~ 400	48 ~ 52
5CrW2Si	700 ~ 750	870 ~ 900	油	56 ~ 61	200 ~ 250 430 ~ 470	53 ~ 58 45 ~ 50
6CrW2Si	650 ~ 700	850 ~ 880	油	58 ~ 63	430 ~ 470	45 ~ 50
Cr6WV	800 ~ 850	950 ~ 970	油	62 ~ 64	150 ~ 210	58 ~ 63
CrWMn	—	820 ~ 840	油	64 ~ 66	150 ~ 200	60 ~ 62
9CrWMn	650	820 ~ 840	油	64 ~ 66	150 ~ 200	≥ 60
WCrV	—	770 ~ 820	水	63 ~ 66	150 ~ 200	≥ 61

(续)

钢 号	淬 火				回 火	
	预热温度/℃	加热温度/℃	淬火介质	硬度 HRC	温度/℃	硬度 HRC
W3CrV	—	760 ~ 810	水	63 ~ 66	150 ~ 200	≥ 62
8W2CrV	650 ~ 750	850 ~ 900	油	54 ~ 66	150 ~ 200	≥ 60
Cr5MoV						
Cr12MoV	840 ~ 860	980 ~ 1050	油	63 ~ 65	200 ~ 400	56 ~ 60
		1100 ~ 1130	油	42 ~ 50	520 ~ 540	60 ~ 61
55SiMoV	650	840 ~ 900	水	60 ~ 63	175 ~ 425	50 ~ 60
SiMnMo	—	790 ~ 820	油	62 ~ 64	150 ~ 250	60 ~ 63
7W7Cr4MoV	840 ~ 860	1080 ~ 1120	油	65 ~ 66	530 ~ 580	59 ~ 62
MnCrWV	—	820 ~ 840	油	63 ~ 65	150 ~ 200	> 60
Cr4W2MoV	800 ~ 850	980 ~ 1040	油或空气	≥ 62	500 ~ 540 (3 次)	60 ~ 62
6W6Mo5Cr4V	830 ~ 850	1180 ~ 1200	油或空气	58	500 ~ 580 (3 次)	58 ~ 63
6Cr4Mo3Ni2WV	800 ~ 850	1080 ~ 1120	油	63	520 ~ 560	59 ~ 62
65Cr4W3Mo2VNb	800 ~ 850	1080 ~ 1180	油或空气	60 ~ 63	540 ~ 560 (2 次)	58 ~ 62
6Cr6W3MoVSi	800 ~ 850	1050 ~ 1070	油	60 ~ 62	540 ~ 560	58 ~ 60
Cr2Mn2SiWMoV	—	830 ~ 870	空气或油	60 ~ 63	180 ~ 200	62 ~ 64

表 7-51 CrWMn 钢淬火和等温淬火后的性能

热 处 理	硬度 HRC	$\alpha_K/J \cdot cm^{-2}$	残留奥氏体(%)
830℃盐浴加热,油淬,320℃回火 1h	54	22.5	2.4 ~ 2.6
830℃盐浴加热,油淬,240℃等温 8h ^①	54.5	101.0	8.55

① 贝氏体等温淬火, $M_s = 216^\circ C$ 。

表 7-52 热作模具钢的淬火、回火规范

钢 号	淬 火				回 火	
	预热温度/℃	加热温度/℃	淬火介质	硬度 HRC	温度/℃	硬度 HRC
3CrAl	—	850 ~ 880	水	≥ 50	580 ~ 650	—
4CrSi	700 ~ 750	880 ~ 890	油	52 ~ 57	240 ~ 270	51 ~ 54
6CrSi	700 ~ 750	850 ~ 870	油	58 ~ 62	240 ~ 270	55 ~ 57
5Cr4Mo	—	880 ~ 920	油	53 ~ 62	600 ~ 620(中型)	43 ~ 45
					640 ~ 660(大型)	37 ~ 38
2Cr9W6V	820 ~ 860	1120 ~ 1140	油	46 ~ 48	570 ~ 580	42 ~ 46
3Cr2W8V	800 ~ 850	1050 ~ 1150	油或空气	49 ~ 56	550 ~ 650	48 ~ 52
5CrNiMo	—	840 ~ 860	油	58 ~ 62	500 ~ 550	38 ~ 41
					400 ~ 480	42 ~ 46
5CrMnMo	—	830 ~ 870	油	58 ~ 62	490 ~ 640	30 ~ 47

(续)

钢 号	淬 火				回 火	
	预热温度/℃	加热温度/℃	淬火介质	硬度 HRC	温度/℃	硬度 HRC
5Cr2MnMo	—	880 ~ 920	油	53 ~ 62	600 ~ 620(中型) 640 ~ 660(大型)	43 ~ 45 37 ~ 38
5CrNiW	—	840 ~ 860	油	58 ~ 62	500 ~ 550	38 ~ 42
5CrNiTi	—	830 ~ 850	油	55 ~ 60	430 ~ 450	42 ~ 47
5W2CrSiV	650	870 ~ 900	油	58 ~ 64	200 ~ 260	40 ~ 58
4W2CrSiV	—	890 ~ 920	油	53 ~ 58	200 ~ 400	51 ~ 56
3W4Cr2V	800 ~ 850	1050 ~ 1080	油	47 ~ 52	630 ~ 660	42 ~ 46
6SiMnV	—	830 ~ 860	油	≥ 60	420 ~ 500	40 ~ 45
4SiCrV	—	860 ~ 900	油	52 ~ 54	600 ~ 660 (2次)	277 ~ 310 HBW
5SiMnMoV	—	840 ~ 870	油	56 ~ 60	490 ~ 510	40 ~ 46
4CrVMoW	800 ~ 850	1000 ~ 1050	油	55 ~ 60	550 ~ 650	46 ~ 51
4Cr5W2SiV	800 ~ 850	1030 ~ 1050	油或空气	52 ~ 57	560 ~ 580	47 ~ 49
4Cr5MoV1Si	800 ~ 850	1020 ~ 1050	油或空气	55 ~ 58	560 ~ 580 (2次)	47 ~ 49
4Cr5MoVSi	800 ~ 850	1000 ~ 1030	油或空气	53 ~ 55	530 ~ 560 (2次)	47 ~ 49
4Cr5W2VSi	800 ~ 850	1030 ~ 1080	油或空气	53 ~ 58	560 ~ 580 (2次)	47 ~ 49
5Cr4W5Mo2V	840 ~ 860	1130 ~ 1140	油	58 ~ 59	600 ~ 630 (2次)	50 ~ 56
35Cr3Mo3VCo3	800 ~ 850	1050 ~ 1100	油或空气	50 ~ 54	500 ~ 600	48 ~ 51
4Cr3Mo3W2V	800 ~ 850	1060 ~ 1130	油	52 ~ 56	680	39 ~ 41
5Cr2MoNiV	700 ~ 750	960 ~ 980	油	58 ~ 59	650 ~ 670	40 ~ 42
5CrMnSiMoV	—	860 ~ 880	油	56 ~ 58	520 ~ 660	37 ~ 48
4Cr4Mo2WVSi	800 ~ 850	1060 ~ 1080	油	55 ~ 60	620 ~ 630	47 ~ 50
5Cr4Mo2W2VSi	800 ~ 850	1080 ~ 1120	油	61 ~ 63	600 ~ 620	52 ~ 54
3Cr5WMoVSi	800 ~ 850	995 ~ 1025	油或空气	52 ~ 57	540 ~ 650	38 ~ 55
4Cr2W2MoVSi	700 ~ 750	1080 ~ 1100	油	56 ~ 58	650 ~ 670	42 ~ 46
5Cr3W3MoVSiNb	700 ~ 750	1120 ~ 1150	油	53 ~ 56	660 ~ 680	42 ~ 46
4Cr3W4Mo2VTiNb	800 ~ 850	1160 ~ 1200	油或空气	55 ~ 59	630 ~ 650 (2次)	50 ~ 53
2Cr6W8Mo2Co8VNb	700 ~ 750	1190 ~ 1200	油	52 ~ 54	650 ~ 670	51 ~ 53
7Mn15Cr2Al3V2WMo	800 ~ 850	1150 ~ 1180	水	20 ~ 22	650 ~ 700	48

表 7-53 常用不锈钢的热处理规范和力学性能

类别	钢 号	热 处 理				力学性能					
		淬火温度 /℃	冷却剂	回火温度 /℃	冷却剂	σ_b / MPa	σ_s / MPa	δ_5 (%)	ψ (%)	a_K / J· cm ⁻²	HRC
						不 小 于					
马氏 体型	1Cr13	1000 ~ 1050	油、水	700 ~ 790	油、水、空	600	420	20	60	90	187HBW
	2Cr13	1000 ~ 1050	油、水	660 ~ 770	油、水、空	600	450	16	55	80	—
	3Cr13	1000 ~ 1050	油	200 ~ 300	—	—	—	—	—	—	48
	4Cr13	1000 ~ 1100	油	200 ~ 300	—	—	—	—	—	—	50
	1Cr17Ni2	950 ~ 1050	油	275 ~ 350	空	1100	—	16	—	50	—
	9Cr18	950 ~ 1050	油	200 ~ 300	油、空	—	—	—	—	—	55
	9Cr18MoV	1050 ~ 1070	油	100 ~ 200	空	—	—	—	—	—	55
铁素 体型	0Cr13	1000 ~ 1050	油、水	700 ~ 790	油、水、空	500	350	24	60	—	—
	1Cr17	—	—	750 ~ 800	空	400	250	20	50	—	—
	0Cr17Ti	—	—	700 ~ 800	空	450	300	20	—	—	—
	1Cr17Ti	—	—	700 ~ 800	空	450	300	20	—	—	—
	1Cr28	—	—	700 ~ 800	空	450	300	20	45	—	—
	1Cr25Ti	—	—	700 ~ 800	空	450	300	20	45	—	—
	1Cr17Mo2Ti	—	—	750 ~ 800	空	500	300	20	55	—	—
	0Cr13Si4NbRE	~ 820	空	—	—	—	—	—	—	—	—
奥氏 体型	0Cr18Ni10	1050 ~ 1100	水	—	—	490	180	40	60	—	—
	1Cr18Ni9	1100 ~ 1150	水	—	—	550	200	45	50	—	—
	1Cr18Mn8Ni5N	1100 ~ 1150	水	—	—	650	300	45	60	—	—
	0Cr18Ni9Ti	1100 ~ 1150	水	—	—	550	200	40	55	—	—
	1Cr18Ni9Ti	1100 ~ 1150	水	—	—	550	200	40	55	—	—
	0Cr18Ni12Mo2Ti	1100 ~ 1150	水	—	—	550	220	40	55	—	—
	1Cr18Ni12Mo2Ti	1100 ~ 1150	水	—	—	550	220	40	55	—	—
	0Cr18Ni12Mo3Ti	1100 ~ 1150	水	—	—	550	220	40	55	—	—
	1Cr18Ni12Mo3Ti	1100 ~ 1150	水	—	—	550	220	40	55	—	—
	00Cr17Ni14Mo2	1050 ~ 1100	水	—	—	500	200	45	60	—	—
	00Cr17Ni14Mo3	1050 ~ 1100	水	—	—	500	200	45	60	—	—
	0Cr18Ni18Mo2Cu2Ti	1050 ~ 1100	水	—	—	650	230	40	—	—	—
	0Cr12Ni25Mo3Cu3Si2Nb	1050 ~ 1100	水	—	—	590	250	24	57	130	155 ~ 165HBW
	0Cr20Ni24Mo3Si3Cu2	—	—	—	—	490	250	40	—	—	140HBW
	0Cr23Ni28Mo3Cu3Ti	1100 ~ 1150	水	—	—	550	200	45	60	—	—
	00Cr18Ni24Mo5	1100 ~ 1150	水	—	—	400	200	45	—	—	—
	0Cr20Ni29Cu4Mo2	—	退火状态	—	—	530	320	50	—	—	120 ~ 180HBW
3Cr17Ni7Mo2N	1130	水	—	—	800	430	35	40	180	≤ 24	
奥氏体、铁素 体型	0Cr21Ni5Ti	950 ~ 1050	空	—	—	550	350	25	40	—	—
	1Cr21Ni5Ti	950 ~ 1100	空	—	—	600	350	20	40	—	—
	1Cr18Mn10Ni5Mo3N	1100 ~ 1150	水	—	—	700	350	45	65	—	—
	0Cr17Mn13Mo2N	1030 ~ 1070	水	—	—	750	450	30	55	—	—
	1Cr17Mn9Ni3Mo3Cu2N	1100 ~ 1150	水	—	—	780	480	27	41	190	—
	0Cr26Ni7Mo3CuSiN	~ 1120	水	—	—	760	570	25	44	100	—
	1Cr18Ni11Si4AlTi	950 ~ 1050	水	—	—	730	450	25	40	80	—

(续)

类别	钢 号	热 处 理				力学性能					
		淬火温度 /℃	冷却剂	回火温度 /℃	冷却剂	σ_b / MPa	σ_s / MPa	δ_5 (%)	ψ (%)	a_K / J· cm ⁻²	HRC
						不 小 于					
沉淀硬化型	0Cr17Ni4Cu4Nb	—	—	—	—	1340	1200	10	40	—	40
	0Cr17Ni7Al	—	—	—	—	1250	1050	4	10	—	388HBW
	0Cr15Ni7Mo2Al	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 7-54 锻造耐热合金常用的固溶处理和时效工艺 (AISI)

合 金	固 溶 处 理			时 效		
	温度/℃	时间/h	冷却方法	温度/℃	时间/h	冷却方法
铁基合金						
A-286	980	1	油淬	720	16	空冷
Discaloy	1010	2	油淬	730	20	空冷
				650	20	空冷
N-155	1175	1	水淬	815	4	空冷
镍基合金						
Astroloy	1175	4	空冷	845	24	空冷
	1080	4	空冷	760	16	空冷
Hastelloy B	1175	0.5	①	②	—	—
Hastelloy B-2	1065	0.5	快速淬火	—	—	—
Hastelloy C-4	1065	0.5	快速淬火	—	—	—
Hastelloy C-276	1120	0.5	快速淬火	—	—	—
Hastelloy N	1175	0.5	快速淬火	—	—	—
Hastelloy S	1065	0.5	快速淬火	—	—	—
Hastelloy C	1220	1	①	②	—	—
Hastelloy W	1175	1	①	②	—	—
Hastelloy X	1175	1	①	—	—	—
Inconel 901	1095	2	水淬	790	2	空冷
				720	24	空冷
Inconel 600	1120	2	空冷	—	—	—
Inconel 601	1150	1	空冷	—	—	—
Inconel 617	1175	2	①	—	—	—
Inconel 625	1150	2	①	—	—	—
Inconel 706	925 ~ 1010	—	—	345	3	空冷
				720	8	炉冷
				620	8	空冷
	925 ~ 1010	—	—	730	8	炉冷
				620	8	空冷
Inconel 718	980	1	空冷	720	8	炉冷
				620	8	空冷
Inconel X-750 (AMS 5667)	855	24	空冷	705	20	空冷
Inconel X-750 (AMS 5668)	1150	2	空冷	845	24	空冷
				705	20	空冷

(续)

合 金	固 溶 处 理			时 效		
	温度/℃	时间/h	冷却方法	温度/℃	时间/h	冷却方法
Nimonic 80A	1080	8	空冷	705	16	空冷
Nimonic 90	1080	8	空冷	705	16	空冷
René41	1065	0.5	空冷	760	16	空冷
Udimet 500	1080	4	空冷	845	24	空冷
				760	16	空冷
Udimet 700	1175	4	空冷	845	24	空冷
	1080	4	空冷	760	16	空冷
Waspaloy	1080	4	空冷	845	24	空冷
				760	16	空冷
钴基合金						
Haynes25、L-605	1230	1	快速空冷	②	—	—
Haynes188	1175	0.5	快速空冷	—	—	—
Haynes556	1175	0.5	快速空冷	—	—	—
S-816	1175	1	①	760	12	空冷
Stellite 6 B	1230	1	空冷	—	—	—

注：交替处理可用于改善特殊性能。

① 在固溶处理后进行完全淬火，在低于约 540℃ 以下应充分快冷，以防止在中间温度范围析出沉淀物。对于多数合金薄板工件，快速空冷是足够的，对于那些不容易开裂的大型工件，经常需要油淬或水淬。

② 在高温服役过程中发生时效。

表 7-55 铸造耐热合金的典型固溶处理和时效工艺 (AISI)

合 金	固 溶 处 理			时 效		
	温度 ^① /℃	时间/h	冷却方法	温度 ^② /℃	时间/h	冷却方法
A-286	1095	2	快冷	720	16	空冷
B-1900	铸造状态	—	—	—	—	—
FSX-414	1150	4	快冷	980	4	空冷
Hastelloy B	1175	2	快冷	③	—	—
Hastelloy C	1220	1	快冷	③	—	—
HS-31(X-40)	铸造状态	—	—	—	—	—
IN-100	铸造状态	—	—	—	—	—
IN-713C	铸造状态	—	—	—	—	—
IN-738	1120	2	空冷	845	24	空冷
IN-792	1120	2	空冷	845	24	空冷
IN-939	1160	4	空冷	850	16	空冷
Inconel718	1095	1	空冷	620	10	空冷
MAR-M200	—	—	—	870	50	空冷
MAR-M 200 DS	1230	4	空冷	870	32	空冷
MAR-M246	—	—	—	845	50	空冷
MAR-M247	—	—	—	870	16	空冷
MAR-M302	铸造状态	—	—	—	—	—
MAR-M509	铸造状态	—	—	—	—	—
René41	1095	0.5	快冷	900	4	空冷

(续)

合 金	固 溶 处 理			时 效		
	温度 ^① /℃	时间/h	冷却方法	温度 ^② /℃	时间/h	冷却方法
René80	1220	2	空冷	1095	4	空冷
				1055	4	空冷
				845	16	空冷
Udimet700	1150	2	空冷	760	16	空冷

① 炉温温差 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 是合适的。② 推荐炉温温差 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 。③ 在高温使用中发生时效。在高于 1040°C 热处理和随后冷却时应使用真空或保护气氛。

7.3 钢的冷处理工艺及效果(表 7-56 ~ 表 7-61 和图 7-1 ~ 图 7-7)

表 7-56 奥氏体稳定化对某些钢深冷处理后性能的影响

钢 种	淬火温度/℃	深冷处理温度/℃	性能的变化		
			马氏体的增加量(%)	硬度的增量/ ΔHRC	长度的增量(%)
T8	780	0	1.2	0.6	—
			0	0	—
T10	780	0	1.6	1.5	—
			0.4	0	—
T12	780	-20	3.2	0.3	—
			0.8	0.3	—
CrMn	850	-50	11.7	2.0	0.299
			10.6	1.5	0.231
CrWMn	820	-80	4.4	2.5	0.087
			2.4	2.5	0.050
GCr15	850	-30	3.0	2.5	0.0499
			2.0	2.5	0.0259
Cr12V	1100	-70	20.5	4.5	—
			17.7	4.5	—
	1150	-90	41.8	18.5	0.588
			40.8	18.5	0.577
18Cr2Ni4WA	850	-85	24.0	3.8	0.211
			22.0	3.8	0.161
	790	-50	4.0	1.3	0.0875
			1.0	1.2	0.062
12Cr2Ni4A	850	-85	16.0	3.8	0.112
			14.5	3.0	0.079

表 7-57 不同钢种深冷处理前在室温下允许停留的时间

残留奥氏体的稳定化敏感程度	钢 种	处理前在室温下允许停留的时间/h
不敏感	18Cr2Ni4WA、20Cr2Ni4A、Cr12V(1150℃ 淬火)	24
中等	CrMn、CrWMn、GCr15、W18Cr4V 以及 Cr12V(1050℃淬火)	2~3
高度敏感	10、15、20、T8、T10、9SiCr	0.5~1

表 7-58 常用钢冷处理温度及性能变化

钢 号	淬火温度/℃	冷处理温度/℃	硬度增量 ΔHRC
9SiCr	860 ~ 880	- 70	0 ~ 1
CrMn	840 ~ 860	- 80	1.5 ~ 2
Cr06	780 ~ 800	- 50	0 ~ 1
Cr2	830 ~ 860	- 70	1 ~ 2

表 7-59 冷处理对 GCr15 钢多次冲击疲劳的影响

热处理规范	多次冲击寿命/min			
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平 均
820℃油淬,回火	85	145	55	95
820℃油淬, - 50℃冷处理	140	70	—	105
820℃油淬, - 80℃冷处理	145	70	220	145
820℃油淬, - 183℃冷处理	60	45	40	50

注:试样形状为环形,外径为 52.25mm,内径为 44.80mm,宽为 15.2mm,在直径方向进行冲击,冲击能量为 6.2J,每分钟 208 次。

表 7-60 冷处理对 T11 钢组织和硬度的影响

加热条件	冷却条件	淬火硬度 HRC	组织成分(体积)(%)	
			残留奥氏体	马 氏 体
790℃ × 30min	53℃水淬	65.9	14.1	83.3
	20℃水淬	67.0	9.0	88.4
	20℃水淬加冷处理 (- 196℃)	68.0	2.9	94.5

注:未溶碳化物均为 2.6%。

表 7-61 冷处理对 CrV 钢组织和硬度的影响

加 热	冷 却 条 件	淬火硬度 HRC	组织(体积)(%)		
			残留奥氏体	马 氏 体	未溶碳化物
843℃ × 30min	230℃盐浴淬水	64.0	10.6	85.4	4.0
	120℃油淬	64.4	9.5	86.5	4.0
	50℃油淬	64.9	9.0	87.0	4.0
	20℃油淬	66.5	7.0	89.0	4.0
	20℃油淬 + (- 196℃冷处理)	67.0	2.0	94.0	4.0

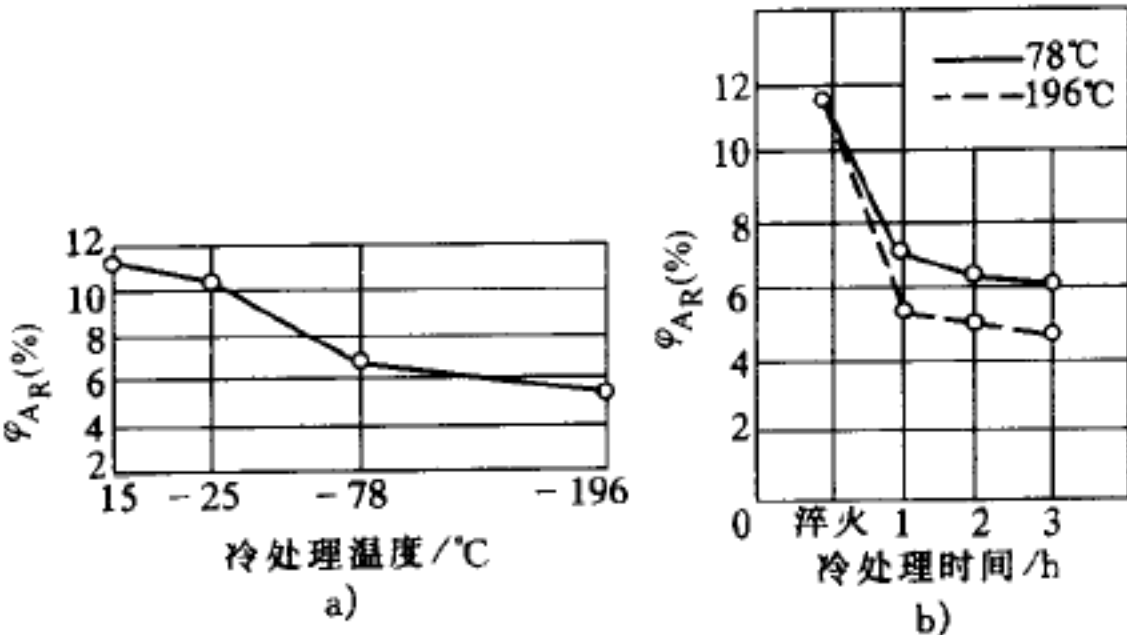


图 7-1 冷处理温度 a)和时间 b)对 GCr15 钢
淬火组织中残留奥氏体量的影响

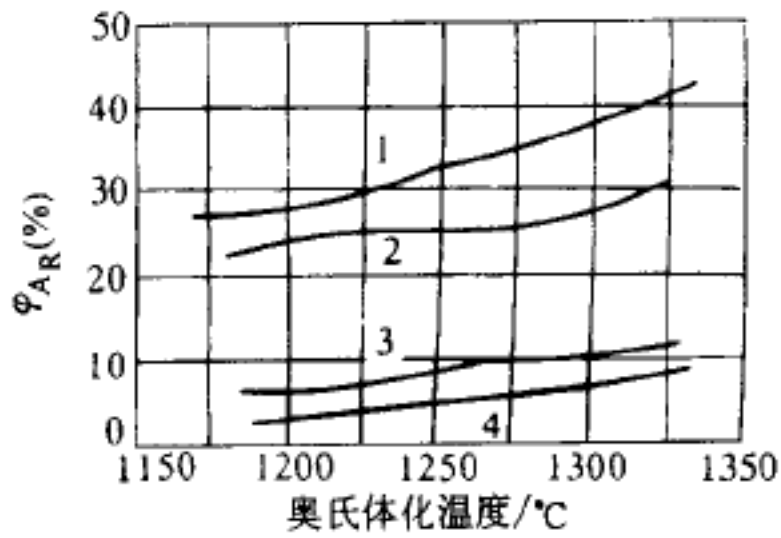


图 7-2 冷处理对 W18Cr4V 钢残留奥氏体量的影响
1—淬火 2—淬火 + (- 84℃)冷处理 3—淬火 + 冷处理
+ 565℃回火一次 4—淬火 + 冷处理 + 565℃回火二次

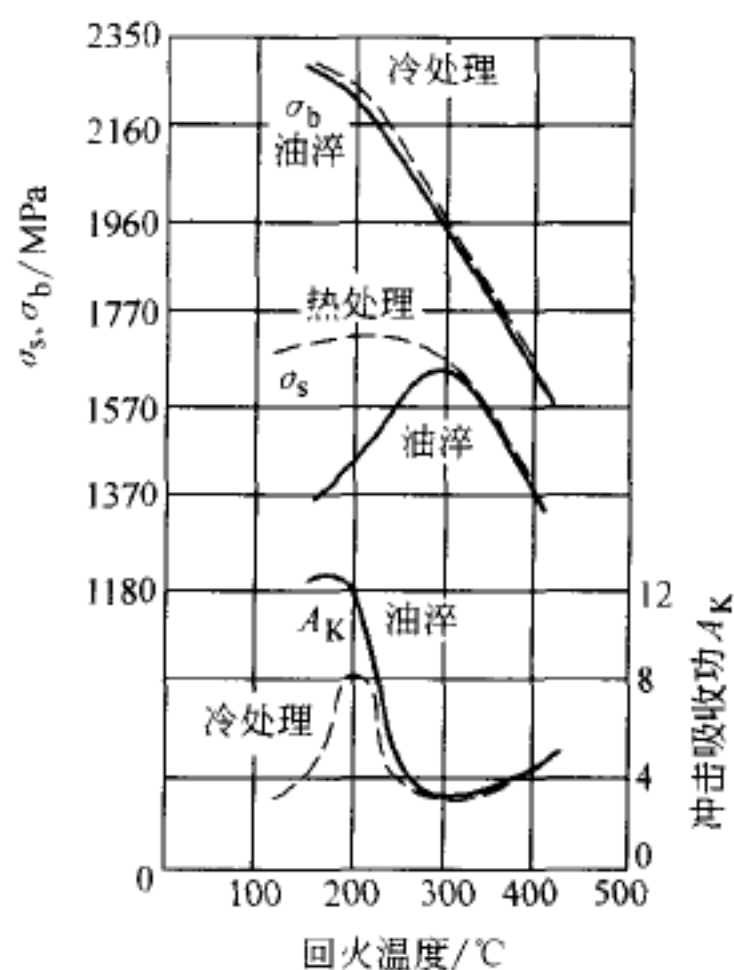


图 7-3 冷处理对 9CrWMn 钢力学性能的影响
(840℃:油淬, -195℃冷处理, 回火 1h)

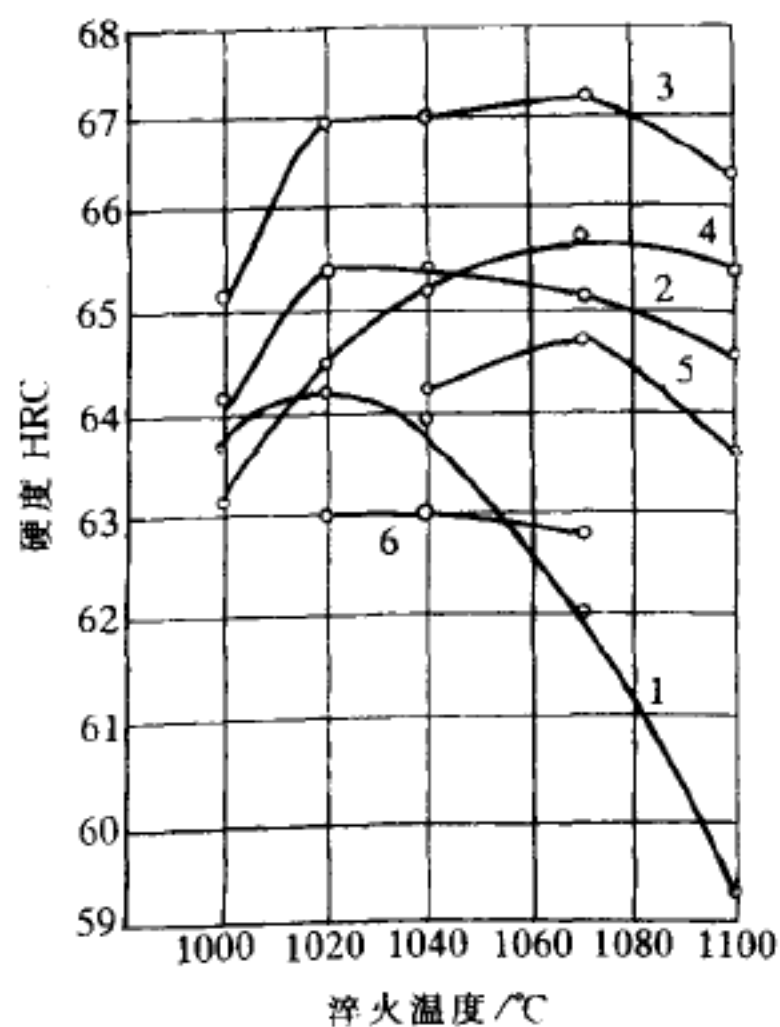


图 7-5 淬火、回火温度与冷处理对
Cr12MoV 钢硬度的影响

1—空冷 2—-73℃冷处理 3—100℃回火
4—150℃回火 5—175℃回火 6—200℃回火

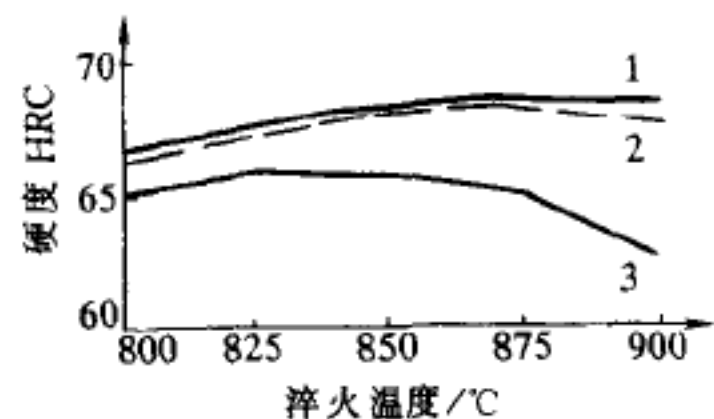


图 7-4 冷处理对 CrWMn 钢的硬度的影响
1—淬火后冷却到 -196℃ 2—淬火后冷却
到 -75℃ 3—油淬

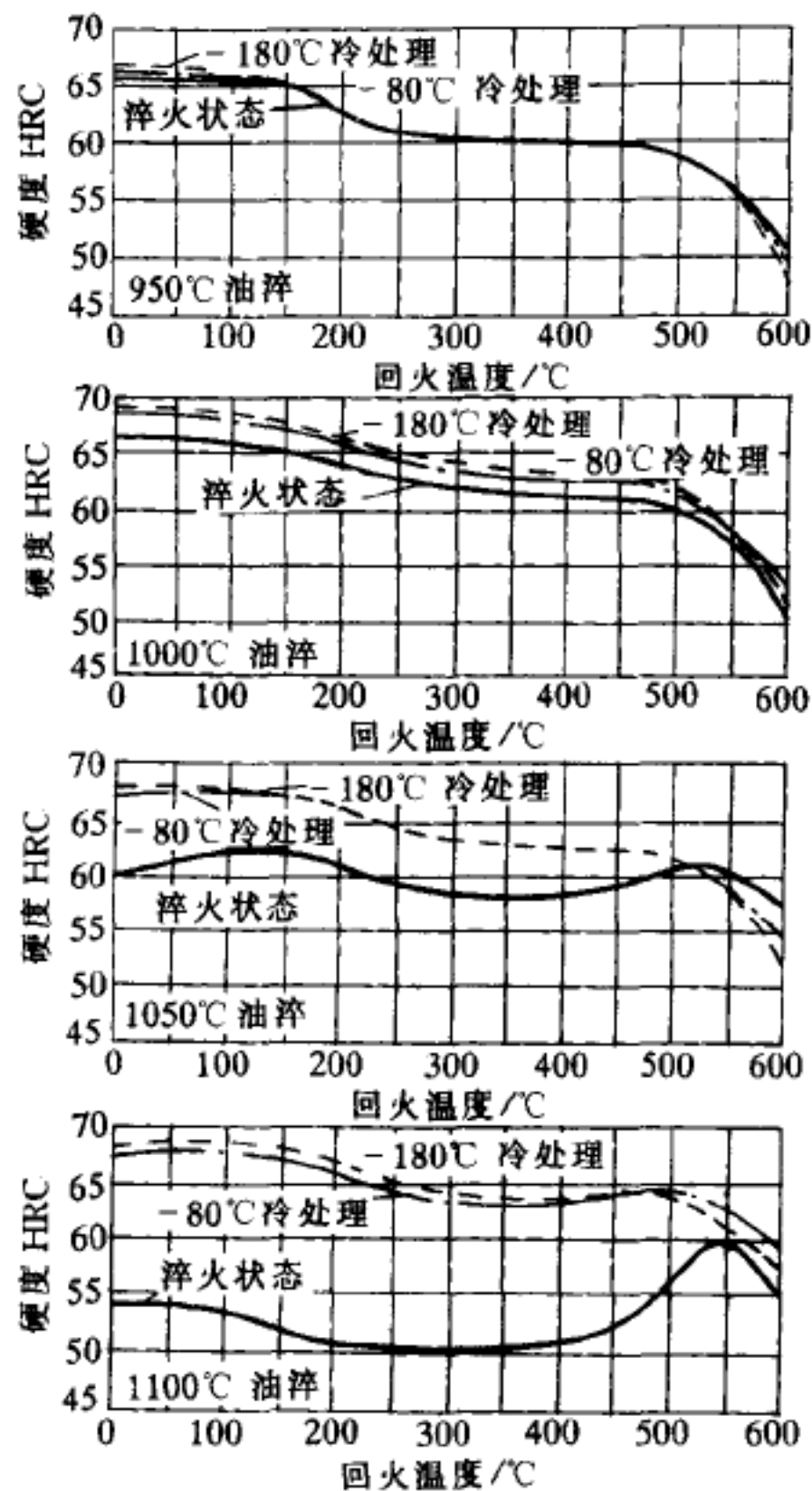


图 7-6 Cr12W(D6)钢不同温度淬火后的回火温度和
冷处理对硬度的影响

(试样直径:30mm, 各淬火加热保温 30min,
各回火温度回火 1h)

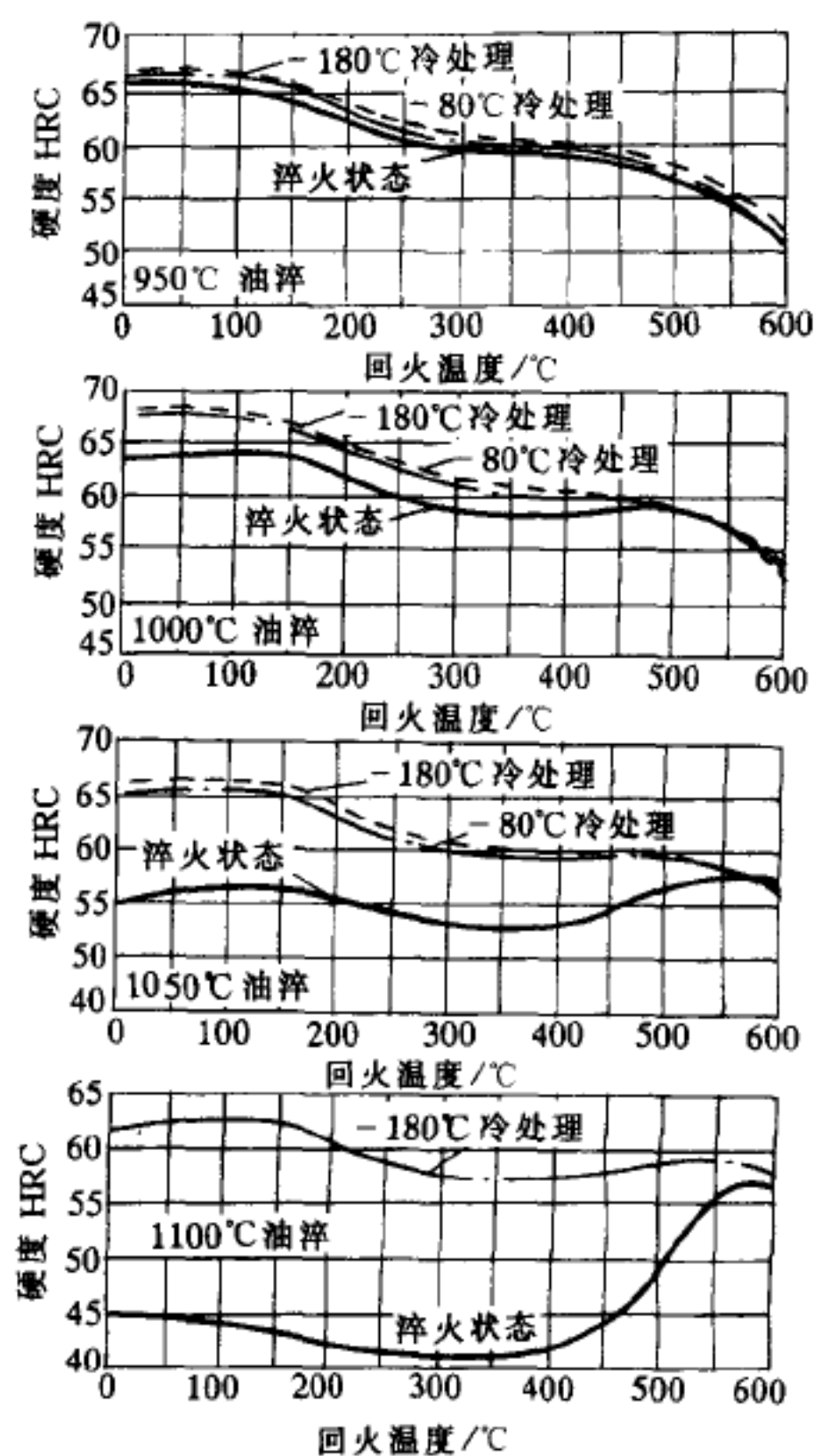


图 7-7 Cr5MoV(A2)钢不同温度淬火和冷处理后的回火温度对硬度的影响
(试样直径: $\phi 30\text{mm}$, 淬火加热时间为 30min, 各温度回火 1h)

第 8 章 铸铁的热处理

8.1 铸铁牌号命名法 (表 8-1 ~ 表 8-3 和图 8-1)

表 8-1 铸铁分类方法

分类方法	分类名称	说 明
按断口颜色	1. 灰铸铁	这种铸铁中的碳大部或全部以自由状态的片状石墨形式存在, 其断口呈暗灰色, 故称为灰铸铁。它有一定的力学性能和良好的可加工性, 是工业上应用最普遍的一种铸铁
	2. 白口铸铁	白口铸铁是组织中完全没有或几乎完全没有石墨的一种铁碳合金, 其中碳全部以渗碳体形式存在, 断口呈白亮色, 因而得名。这种铸铁硬而且脆, 不能进行切削加工, 工业上很少直接应用它来制作机械零件。在机械制造中, 有时仅利用它来制作需要耐磨而不承受冲击载荷的机件, 如拉丝板、球磨机的磨球等, 或用激冷的办法制作内部为灰铸铁组织, 表层为白口铸铁组织的耐磨零件, 如火车轮圈、轧辊、犁铧等。这种铸铁具有很高的表面硬度和耐磨性, 通常又称为激冷铸铁或冷硬铸铁
	3. 麻口铸铁	这是介于白口铸铁和灰铸铁之间的一种铸铁, 它的组织由珠光体 + 渗碳体 + 石墨组成, 断口呈灰白相间的麻点状, 故称麻口铸铁, 这种铸铁性能不好, 极少应用
按化学成分	1. 普通铸铁	普通铸铁是指不含任何合金元素的铸铁, 一般常用的灰铸铁、可锻铸铁、激冷铸铁和球墨铸铁等, 都属于这一类铸铁
	2. 合金铸铁	它是在普通铸铁内有意识地加入一些合金元素, 借以提高铸铁某些特殊性能而配制成的一种高级铸铁, 如具有耐蚀、耐热、耐磨特殊性能铸铁, 都属于这一类型的铸铁
按生产方法和组织性能	1. 普通灰铸铁	(参见“灰铸铁”)
	2. 孕育铸铁	孕育铸铁又称变质铸铁, 它是在灰铸铁的基础上, 采用“变质处理”, 即是在铁液中加入少量的变质剂 (硅铁或硅钙合金), 造成人工晶核, 使能获得细晶粒的珠光体和细片状石墨组织的一种高级铸铁。这种铸铁的强度、塑性和韧性均比一般灰铸铁要好得多, 组织也较均匀一致, 主要用来制造力学性能要求较高而截面尺寸变化较大的大型件
	3. 可锻铸铁	可锻铸铁是由一定成分的白口铸铁经石墨化退火后而成, 其中碳大部或全部呈团絮状石墨的形式存在, 由于其对基体的破坏作用较之片状石墨大大减轻, 因而比灰铸铁具有较高的韧性, 故又称韧性铸铁。可锻铸铁实际并不可锻造, 只不过具有一定的塑性而已, 通常多用来制造承受冲击载荷的铸件
	4. 球墨铸铁	球墨铸铁简称球铁。它是通过在浇注前往铁液中加入一定量的球化剂 (如纯镁或其合金) 和石墨化剂 (硅铁或硅钙合金), 以促进碳呈球状石墨结晶而获得的。由于石墨呈球形, 应力大为减轻, 它主要减小金属基体的有效截面积, 因而这种铸铁的力学性能比普通灰铸铁高得多, 也比可锻铸铁好; 此外, 它还具有比灰铸铁好的焊接性和接受热处理的性能; 和钢相比, 除塑性、韧性稍低外, 其他性能均接近, 是一种同时兼有钢和铸铁优点的优良材料, 因此在机械工程上获得了广泛的应用
	5. 特殊性能铸铁	这是一组具有某些特性的铸铁, 根据用途的不同, 可分为耐磨铸铁、耐热铸铁、耐蚀铸铁等等。这类铸铁大部分都属于合金铸铁, 在机械制造上应用也较为广泛

表 8-2 各种铸铁名称、代号及牌号表示方法实例表

铸铁名称	代 号	牌号表示方法实例	铸铁名称	代 号	牌号表示方法实例
灰铸铁	HT	HT100	抗磨白口铸铁	KmTB	KmTBMn5Mo2Cu
蠕墨铸铁	RuT	RuT400	抗磨球墨铸铁	KmQT	KmQTMn6
球墨铸铁	QT	QT400—18	冷硬铸铁	LT	LTCrMoR
黑心可锻铸铁	KHT	KHT300—06	耐蚀铸铁	ST	STSi15R
白心可锻铸铁	KBT	KBT350—04	耐蚀球墨铸铁	STQ	STQAl5Si5
珠光体可锻铸铁	KZT	KZT450—06	耐热铸铁	RT	RTCr2
耐磨铸铁	MT	MTCu1PTi—150	耐热球墨铸铁	RQT	RQTA16
			奥氏体铸铁	AT	—

铸铁牌号示例说明如下：

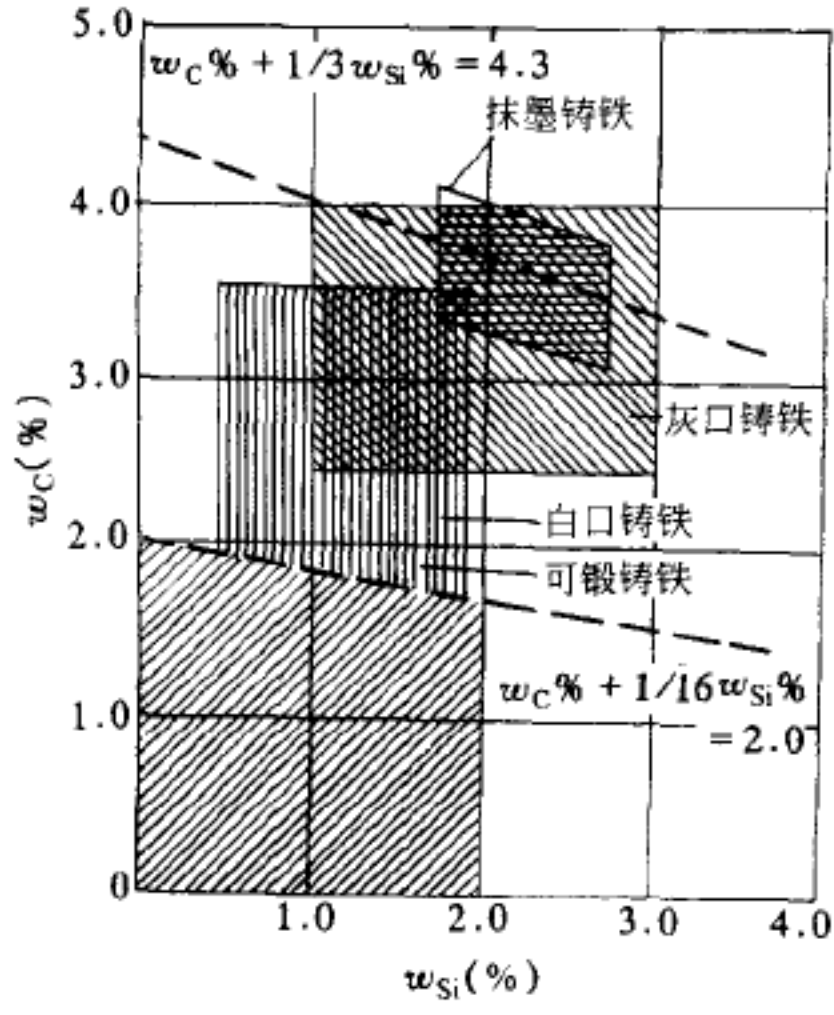
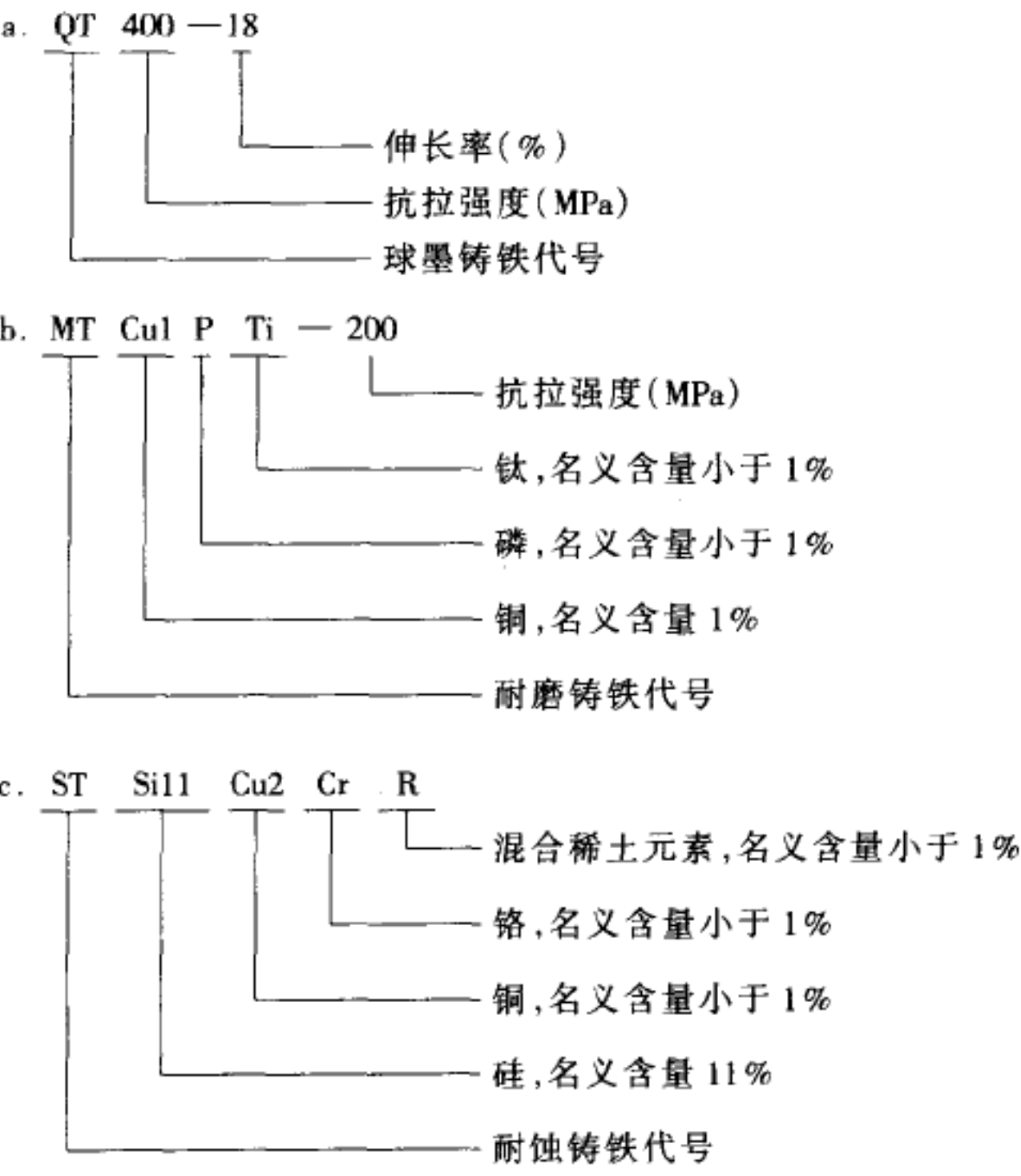


图 8-1 普通铸铁碳和硅的成分范围

表 8-3 典型普通铸铁的化学成分范围

铸铁类型	化学成分 (质量分数) (%)				
	C	Si	Mn	P	S
灰铸铁	2.5 ~ 4.0	1.0 ~ 3.0	0.2 ~ 1.0	0.002 ~ 1.0	0.02 ~ 0.25
球墨铸铁	3.0 ~ 4.0	1.8 ~ 2.8	0.1 ~ 1.0	0.01 ~ 0.1	0.01 ~ 0.03
可锻铸铁	2.2 ~ 2.9	0.9 ~ 1.9	0.15 ~ 1.2	0.02 ~ 0.2	0.02 ~ 0.2
蠕墨铸铁	2.5 ~ 4.0	1.0 ~ 3.0	0.2 ~ 1.0	0.01 ~ 0.1	0.01 ~ 0.03
白口铸铁	1.8 ~ 3.6	0.5 ~ 1.9	0.25 ~ 0.8	0.06 ~ 0.2	0.06 ~ 0.2

8.2 灰铸铁成分、热处理工艺和性能

1. 灰铸铁成分和性能 (表 8-4 ~ 表 8-11)

表 8-4 砂型铸造灰铸铁化学成分

牌 号		铸件主要壁厚 /mm	化学成分（质量分数）（%）					
			C	Si	Mn	P	S	
普通灰铸铁	TH100	所有尺寸	3.2~3.8	2.1~2.7	0.5~0.8	<0.3	≤0.15	
	HT150	<15	3.3~3.7	2.0~2.4	0.5~0.8	<0.2	≤0.12	
		15~30	3.2~3.6	2.0~2.3				
		30~50	3.1~3.5	1.9~2.2				
		>50	3.0~3.4	1.8~2.1				
	HT200	<15	3.2~3.6	1.9~2.2	0.6~0.9	<0.15	≤0.12	
		15~30	3.1~3.5	1.8~2.1	0.7~0.9			
		30~50	3.0~3.4	1.5~1.8	0.8~1.0			
		>50	3.0~3.2	1.4~1.7	0.8~1.0			
	孕育铸铁	HT250	<15	3.2~3.5	1.8~2.1	0.7~0.9	<0.15	≤0.12
			15~30	3.1~3.4	1.6~1.9	0.8~1.0		
			30~50	3.0~3.3	1.5~1.8	0.8~1.0		
>50			2.9~3.2	1.4~1.7	0.9~1.1			
HT300		<15	3.1~3.4	1.5~1.8	0.8~1.0	<0.15	≤0.12	
		15~30	3.0~3.3	1.4~1.7	0.8~1.0			
		30~50	2.9~3.2	1.4~1.7	0.9~1.1			
		>50	2.8~3.1	1.3~1.6	1.0~1.2			
HT350		<15	2.9~3.2	1.4~1.7	0.9~1.2	<0.15	≤0.12	
		15~30	2.8~3.1	1.3~1.6	1.0~1.3			
		30~50	2.8~3.1	1.2~1.5	1.0~1.3			
		>50	2.7~3.0	1.1~1.4	1.1~1.4			

表 8-5 灰铸铁件的特点和应用范围

牌 号	铸铁级别	主要特点	应用范围	
			工作条件	用途举例
HT100 (铁素体灰铸铁件)	低强度铸铁, 对金相组织及强度无较高要求者	铸造性能好, 工艺简便; 铸造应力小, 不用人工时效处理; 减振性优良	1. 负荷极低 2. 对摩擦或磨损无特殊要求 3. 变形很小	1. 盖、外罩、油盘、手轮、手把、支架、底板、重锤等形状简单、不甚重要的零件 2. 对强度无要求的其他机械结构零、部件
HT150 (铁素体珠光体灰铸铁件)	中等强度铸件, 基体组织为珠光体+铁素体(20%)	铸造性能好, 工艺简单; 铸造应力小, 不用人工时效; 有一定的机械强度及良好的减振性	1. 承受中等应力的零件 2. 摩擦面间的单位面积压力<490kPa下受磨损的零件 3. 在弱腐蚀介质中工作的零件	1. 一般机械制造中的铸件, 如: 支柱、底座、罩壳、齿轮箱、刀架、刀架座、普通机床床身及其他形状复杂、对强度要求不高、不容许有甚大变形又不能进行人工时效处理的零件 2. 滑板、工作台等与较高强度铸铁床身(如HT200)相摩擦的零件 3. 薄壁(重量不大)零件, 工作压力不大的管子配件以及壁厚≤30mm的耐磨轴套等 4. 在纯碱或染料介质中工作的化工零件 5. 圆周速度6~12m/s的带轮以及其他符合所列条件的零件

(续)

牌 号	铸铁级别	主要特点	应用范围	
			工作条件	用途举例
HT200 HT250 (珠光体灰铸铁件)	较高强度铸件, 基体组织为珠光体	强度、耐磨性、耐热性均较好, 减振性也良好; 铸造性能较好, 需进行人工时效处理	1. 承受较大应力的零件 2. 摩擦面间的单位面积压力 $> 490\text{kPa}$ (大于 10t 在磨损下工作的大型铸件可 $> 1470\text{kPa}$) 4. 要求一定的气密性或耐弱腐蚀性介质	1. 一般机械制造中较为重要的铸件, 如: 气缸、齿轮、机座、金属切削机床床身及床面等 2. 汽车、拖拉机的气缸体、气缸盖、活塞、制动轮、联轴器盘以及汽油机和柴油机的活塞环 3. 具有测量平面的检验工件, 如: 划线平板、V形铁、平尺、水平仪框架等 4. 承受中等压力的油缸、泵体、阀体以及要求有一定耐腐蚀能力的泵壳、容器 5. 圆周速度 $12 \sim 15\text{m/s}$ 的带轮以及其他符合所列工作条件的零件 6. 需经表面淬火的零件
HT300 HT350 (孕育铸铁件)	高强度、高耐磨性铸件 基体组织为 100% 珠光体, 属于需要采用孕育处理的铸件	强度高, 耐磨性好; 白口倾向大, 铸造性能差, 需进行人工时效处理	1. 承受高弯曲应力及抗拉应力 2. 摩擦面间的单位面积压力 $\geq 1960\text{kPa}$ 3. 要求保持高度气密性	1. 机械制造中重要的铸件, 如: 床身导轨, 车床、冲床、剪床和其他重型机械等受力较大的床身、机座、主轴箱、卡盘、齿轮、凸轮、衬套; 大型发动机的曲轴、气缸体、缸套、气缸盖等 2. 高压的油缸、水缸、泵体、阀体 3. 锻锻和热锻锻模、冷冲模等 4. 需经表面淬火的零件 5. 圆周速度 $20 \sim 25\text{m/s}$ 的皮带轮以及符合左列工作条件的其他零件

表 8-6 灰铸铁的静载力学性能

牌 号		抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ (%)	抗弯强度 σ_{bb} /MPa	挠度 f /mm	抗压强度 σ_{bc} /MPa	硬度 HBW	抗剪强度 /MPa	抗扭强度 /MPa	拉伸弹性模量 E_0 /GPa	抗扭弹性模量 /GPa	备注
中 国	HT100	100		260	2		143 ~ 229	—				1. $\phi 30\text{mm}$ 试棒 2. 除 σ_b 外, 其他性能仅供参考
	HT150	150		330	2.5	600 ~ 800	143 ~ 241	—				
	HT200	200	0.3 ~	400	2.5	600 ~ 800	163 ~ 241	248	抗扭强度 $= (1.11 \sim 1.45\sigma_b)$	参考孕育铸铁		
	HT250	250	0.8	470	3	800 ~ 1000	163 ~ 255	282				
	HT300	300		540	3	1000 ~ 1200	170 ~ 255	293				
	HT350	350		610	3.5	1200 ~ 1350	170 ~ 269	422				
孕 育 铸 铁	GF150	150				650	150 ~ 190	150		90		$\phi 30\text{mm}$ 试棒
	GE200	200				800	170 ~ 210	200		105		
	GE225	225				875	175 ~ 215	225		112		
	GD250	250				950	180 ~ 220	250		120		
	GC275	275		575 ^①	6.6 ~ 8.7	1025	185 ~ 225	275	322 ^②	128		
	GB300	300		595 ^①	7.0 ~ 8.7	1100	190 ~ 230	300	392 ^②	135		
	GA350	350		625 ^①	7.0 ~ 8.7	1250	200 ~ 240	350	423 ^②	145		
	GM400	400		655 ^①	7.0 ~ 8.7	1400	210 ~ 280	400	450 ^②	150		

(续)

牌 号	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ (%)	抗弯强度 σ_{bb} /MPa	挠度 f /mm	抗压强度 σ_{bc} /MPa	硬度 HBW	抗剪强度 /MPa	抗扭强度 /MPa	拉伸弹性 模量 E_0 /GPa	抗扭弹性模量 /GPa	备注	
ASTMA48-1983	20	0.6			572	156	179		66~97	27~39	壁厚 /mm	试棒 直径
	25	0.6			669	174	220		79~102	32~41	<6	a
	30	0.6			752	210	276		90~113	36~45	6~12	$\phi 22.4$
	35	0.6			855	212	334		100~119	40~48	13~25	$\phi 30.5$
	40	0.6			965	235	393		110~138	44~54	26~50	$\phi 50.8$
	50	0.6			1130	262	503		130~157	50~55	>50	a
	60	0.6			1293	302	610		141~162	54~59	a—供需双方商定	

注: GF150~GM400 为密烘铸铁 (Meehanite) 标准。

① 试棒 $\phi 30.5\text{mm}$, 长度 458mm。② 试棒 $\phi 19\text{mm}$, 长 382mm。

表 8-7 不同壁厚的灰铸铁件的抗拉强度参考数值

牌 号	铸件壁厚/mm		最小抗拉强度 σ_b /MPa (kgf/mm ²)	牌 号	铸件壁厚/mm		最小抗拉强度 σ_b /MPa (kgf/mm ²)
	大于	至			大于	至	
HT100	2.5	10	130 (13.3)	HT250	4.0	10	270 (27.5)
	10	20	100 (10.2)		10	20	240 (24.5)
	20	30	90 (9.2)		20	30	220 (22.4)
	30	50	80 (8.2)		30	50	200 (20.4)
HT150	2.5	10	175 (17.8)	HT300	10	20	290 (29.6)
	10	20	145 (14.8)		20	30	250 (25.5)
	20	30	130 (13.3)		30	50	230 (23.5)
	30	50	120 (12.2)				
HT200	2.5	10	220 (22.4)	HT350	10	20	340 (34.7)
	10	20	195 (19.9)		20	30	290 (29.6)
	20	30	170 (17.3)		30	50	260 (26.5)
	30	50	160 (16.3)				

注: 当一定牌号的铁液浇注壁厚均匀而形状简单的铸件时, 壁厚变化所造成抗拉强度的变化, 可从本表查出参考性数据, 当铸件壁厚不均匀, 或有型芯时, 此表仅能近似地给出不同壁厚处的大致的抗拉强度值, 铸件设计应根据关键部位的实测值进行。

表 8-8 灰铸铁的硬度与抗拉强度的关系

σ_b /MPa (kgf/mm ²)	RH					σ_b /MPa (kgf/mm ²)	RH				
	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2		0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
	布氏硬度 HBW						布氏硬度 HBW				
80 (8.2)	82	92	102	112	122	220 (22.4)	157	177	196	216	236
100 (10.2)	93	105	116	128	140	240 (24.5)	164	185	205	226	247
120 (12.2)	105	118	131	144	157	260 (26.5)	171	192	214	235	257
140 (14.3)	116	131	145	160	174	280 (28.6)	178	200	223	245	267
160 (16.3)	129	144	160	176	192	300 (30.6)	185	208	231	255	278
180 (18.4)	139	157	174	192	209	320 (32.6)	192	216	240	264	288
200 (20.4)	150	169	188	206	225	340 (34.7)	199	224	249	274	298

(续)

$\sigma_b/\text{MPa}(\text{kgf}/\text{mm}^2)$	RH	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	$\sigma_b/\text{MPa}(\text{kgf}/\text{mm}^2)$	RH	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
	布氏硬度 HBW					布氏硬度 HBW							
360(36.7)		205	232	258	283	309	400(40.8)		220	248	275	303	330
380(38.8)		213	240	266	293	320							

注:1. 灰铸铁的硬度和抗拉强度之间,存在一定的对应关系,其经验关系式为:

a. 当 $\sigma_b \geq 196\text{MPa}$ 时, $\text{HB} = \text{RH}(100 + 0.438\sigma_b)(\text{B1})$ 。

b. 当 $\sigma_b < 196\text{MPa}$ 时, $\text{HB} = \text{RH}(44 + 0.724\sigma_b)(\text{B2})$ 。

式中相对硬度(RH)值主要由原材料、熔化工艺、处理工艺以及铸件的冷却速度所确定。

2. 灰铸铁的相对硬度值(RH)的变化范围为 0.80 ~ 1.20 之间。

3. 测定 RH 值,可用单铸试棒(或铸件上)测定抗拉强度和硬度,由公式(B1)、(B2)计算灰铸铁的 RH 值。

4. 根据在铸件上实测得到的 HB 硬度值,可由公式(B1)、(B2)计算出该抗拉强度值。

表 8-9 灰铸铁硬度分级(按 GB/T 9439—1988 附录 A)

硬度分级	H145	H175	H195	H215	H235	H255
铸件上的硬度范围 HBW	≤ 170	150 ~ 200	170 ~ 220	190 ~ 240	210 ~ 260	230 ~ 280

注:需方如果要求以硬度作为检验灰铸铁件材质的力学性能时应符合表列规定。

表 8-10 灰铸铁的疲劳性能

牌 号	HT100		HT150		HT200		HT250		HT300		HT350					
抗拉强度 σ_b/MPa	100		150		200		250		300		350					
疲劳极限 σ_{-1}/MPa	—		—		88 ~ 108		98 ~ 127		127 ~ 167		147 ~ 196					
疲劳比 σ_{-1}/σ_b	—		—		0.44 ~ 0.54		0.39 ~ 0.51		0.42 ~ 0.56		0.42 ~ 0.56					
密烘铸铁牌号	GF150		GE200		GE225		GD250		GC275		GB300		GA350		GM400	
抗拉强度 σ_b/MPa	150		200		225		250		275		300		350		400	
疲劳极限 σ_{-1}/MPa	70		90		100		110		125		140		160		190	
疲劳比 σ_{-1}/σ_b	0.47		0.45		0.44		0.44		0.45		0.47		0.46		0.48	
美国 ASTM A48—83 牌号	20		25		30		35		40		50		60			
抗拉强度 σ_b/MPa	138		172		207		241		276		379		414			
疲劳极限 σ_{-1}/MPa	69		79		97		110		128		148		169			
疲劳比 σ_{-1}/σ_b	0.45		0.44		0.45		0.44		0.44		0.41		0.39			

注:A48—83 用铸态试棒。

表 8-11 灰铸铁的物理性能

铸铁 牌号	密度 ρ $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	比热容 $c/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$			熔解热 $/\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$	热膨胀系数 $\alpha/\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$				热导率 $/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	电阻率 $/\mu\Omega\cdot\text{cm}$
		0 ~ 200 $^{\circ}\text{C}$	0 ~ 1000 $^{\circ}\text{C}$	常温 ~ 熔点		一般	0 ~ + 100 $^{\circ}\text{C}$	0 ~ + 200 $^{\circ}\text{C}$	0 ~ + 500 $^{\circ}\text{C}$		
HT100	6.8 ~ 7.0									54.43 ~ 58.61	90 ~ 105
HT150	7.0 ~ 7.2									52.34 ~ 56.52	80 ~ 95
HT200	7.2 ~ 7.3	502.42	669.89	921.10	209.34	10.1		11.5	13.0	50.24 ~ 54.43	75 ~ 85
HT250	7.25 ~ 7.35	~	~	~	~	~	10.5	~	~	48.15 ~ 52.34	65 ~ 75
HT300	7.3 ~ 7.4	544.28	711.76	962.96	230.27	12.6		12.0	13.5	46.05 ~ 50.24	55 ~ 65
HT350	7.3 ~ 7.45									43.96 ~ 48.15	50 ~ 60

(续)

铸铁 牌号	密度 ρ $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	比热容 $c/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$			熔解热 $/\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$	热膨胀系数 $\alpha/\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$				热导率 $/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	电阻率 $/\mu\Omega\cdot\text{cm}$
		0~ 200 $^{\circ}\text{C}$	0~ 1000 $^{\circ}\text{C}$	常温~ 熔点		一般	0~ +100 $^{\circ}\text{C}$	0~ +200 $^{\circ}\text{C}$	0~ +500 $^{\circ}\text{C}$		
GF150	7.0								13	55	
GF200	7.1								13	53	
GE225	7.15								13	52	
GD250	7.2								13	51	
GC275	7.25								13	50	
GB300	7.3								13	49	
GA350	7.3								13	47	
GM400	7.4								13	45	

2. 灰铸铁热处理工艺(图 8-2 和图 8-3,表 8-12 和表 8-13)

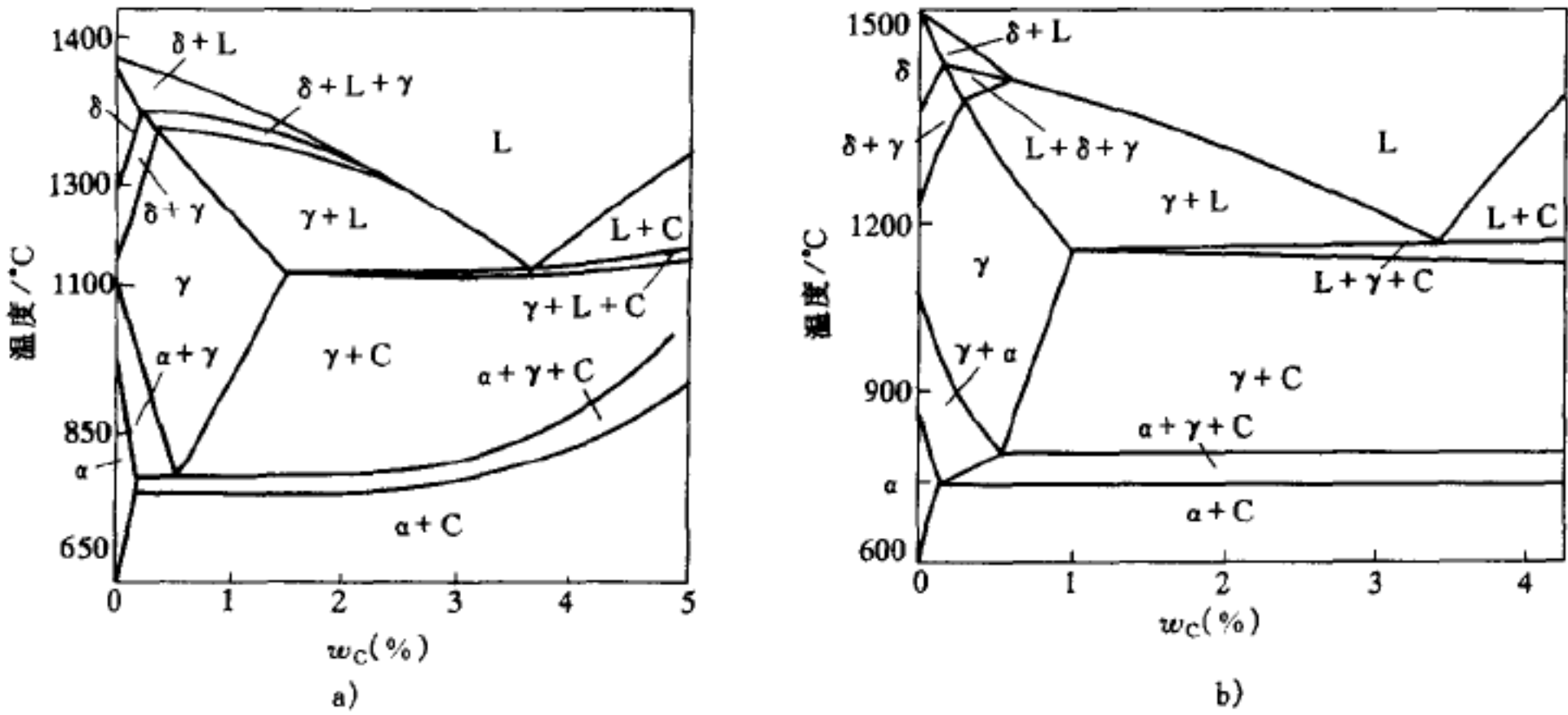


图 8-2 Fe-C-Si 三元相图变温截面

a) 亚稳系 $w_{\text{Si}}2.0\%$ b) 稳定系 $w_{\text{Si}}2.4\%$

表 8-12 几种灰铸铁的化学成分与临界温度

化学成分(质量分数)(%)									临界温度/ $^{\circ}\text{C}$			
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Ac_1	Ac_1'	Ar_1	Ar_1'
2.83	2.17	0.50	0.09	0.13	—	—	—	—	775	830	765	723
2.86	2.27	0.50	0.09	0.14	0.70	1.70	—	—	770	825	750	700
2.86	2.23	0.50	0.10	0.15	0.95	3.00	—	—	770	825	750	700
2.85	2.24	0.45	0.10	0.13	—	2.30	0.90	—	780	830	725	625
2.86	2.24	0.50	0.09	0.12	0.35	—	0.69	—	775	850	775	700
2.85	2.25	0.55	0.09	0.13	—	—	—	3.00	770	825	725	680

表 8-13 几种合金元素对铸铁 Ar_1 及 Ar_1' 的影响

元 素	成分范围 (质量分数) (%)	$\Delta Ar_1 / ^\circ\text{C}$	$\Delta Ar_1' / ^\circ\text{C}$
Si	0.3 ~ 3.5	+ 37	+ 28
P	0 ~ 0.2	+ 222	+ 222
Mn	0 ~ 1.0	- 37	- 130
Cr	0 ~ 1.0	- 17	- 23
Ni	0 ~ 1.0	微	微
S、Cu		微	微

注：表中数字为合金元素含量增加 1% 产生的影响。

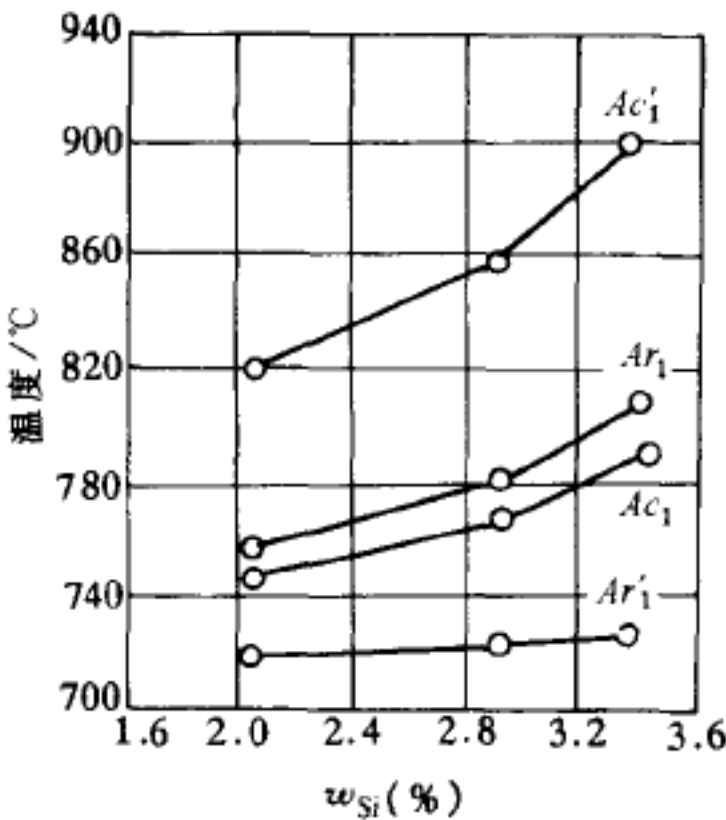


图 8-3 硅对共析临界温度的影响

(1) 退火(表 8-14 和表 8-15,图 8-4 ~ 图 8-9)。

表 8-14 灰铸铁铸件去应力退火规范

铸件种类	铸件质量 /kg	铸件壁厚 /mm	装炉温度 /°C	升温速度 /°C·h ⁻¹	加热温度/°C		保温时间 /h	缓冷速度 /°C·h ⁻¹	出炉温度 /°C
					普通铸铁	低合金铸铁			
一般铸件	< 200		≤ 200	≤ 100	500 ~ 550	550 ~ 570	4 ~ 6	30	≤ 200
	200 ~ 2500		≤ 200	≤ 80	500 ~ 550	550 ~ 570	6 ~ 8	30	≤ 200
	> 2500		≤ 200	≤ 60	500 ~ 550	550 ~ 570	8	30	≤ 200
精密铸件	< 200		≤ 200	≤ 100	500 ~ 550	550 ~ 570	4 ~ 6	20	≤ 200
	200 ~ 3500		≤ 200	≤ 80	500 ~ 550	550 ~ 570	6 ~ 8	20	≤ 200
简单或圆筒状铸件	< 300	10 ~ 40	100 ~ 300	100 ~ 150	550 ~ 600		2 ~ 3	40 ~ 50	< 200
一般精度铸件	100 ~ 1000	15 ~ 60	100 ~ 200	< 75	500		8 ~ 10	40	< 200
结构复杂 较高精度铸件	1500	< 40	< 150	< 60	420 ~ 450		5 ~ 6	30 ~ 40	< 200
	1500	40 ~ 70	< 200	< 70	450 ~ 550		8 ~ 9	20 ~ 30	< 200
	1500	> 70	< 200	< 75	500 ~ 550		9 ~ 10	20 ~ 30	< 200
纺织机械小铸件	< 50	< 15	< 150	50 ~ 70	500 ~ 550		1.5	30 ~ 40	150
机床小铸件	< 1000	< 60	≤ 200	< 100	500 ~ 550		3 ~ 5	20 ~ 30	150 ~ 200
机床大铸件	> 2000	20 ~ 80	< 150	30 ~ 60	500 ~ 550		8 ~ 10	30 ~ 40	150 ~ 200

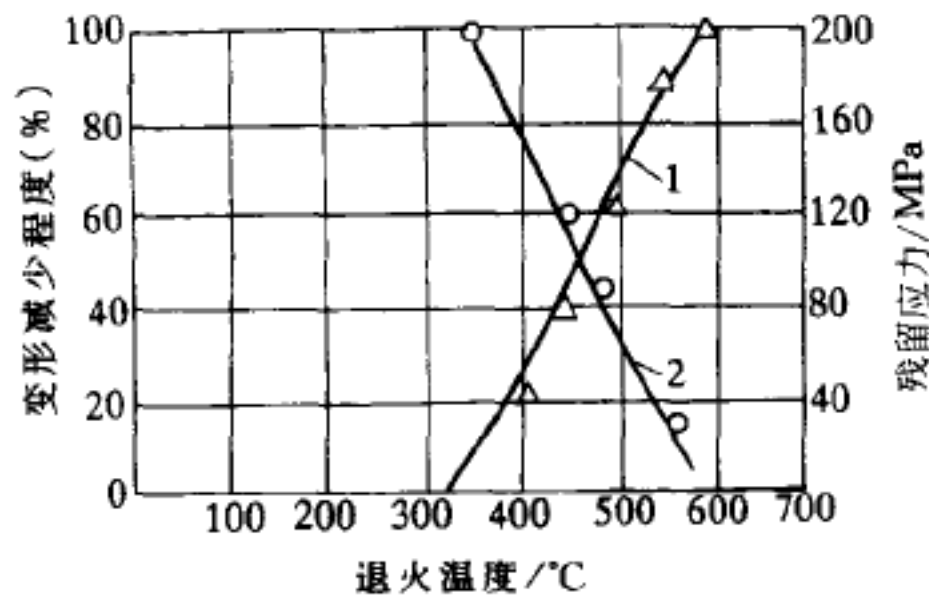


图 8-4 灰铸铁退火温度与内应力消除程度的关系

1—变形减少程度 2—残留内应力

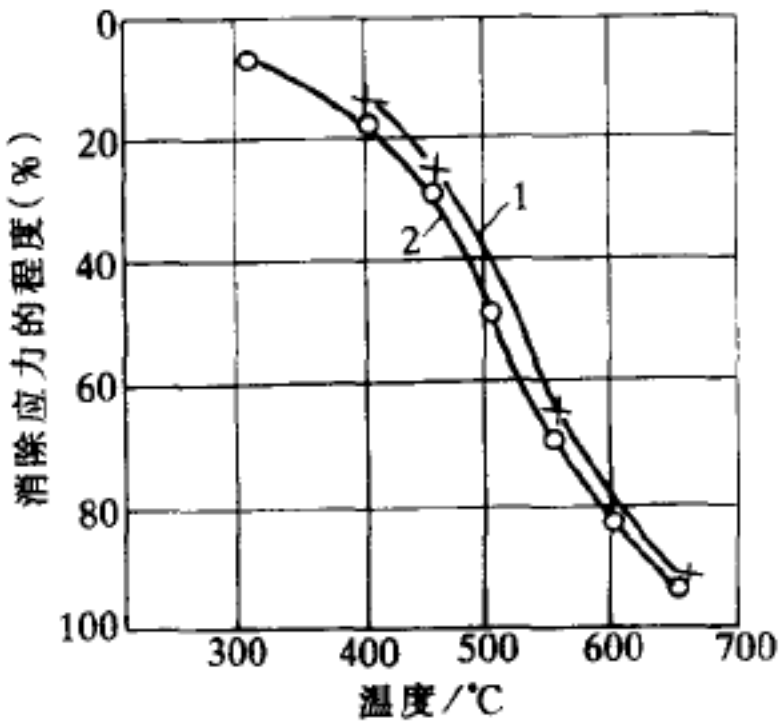


图 8-5 低 Cr、Ni 合金灰铸铁(质量分数)(%) (C3.2, Si2.01, Mn0.89, P0.17, Ni0.10, Cr0.11)

退火温度与残留内应力的关系
1—原始应力低 2—原始应力高

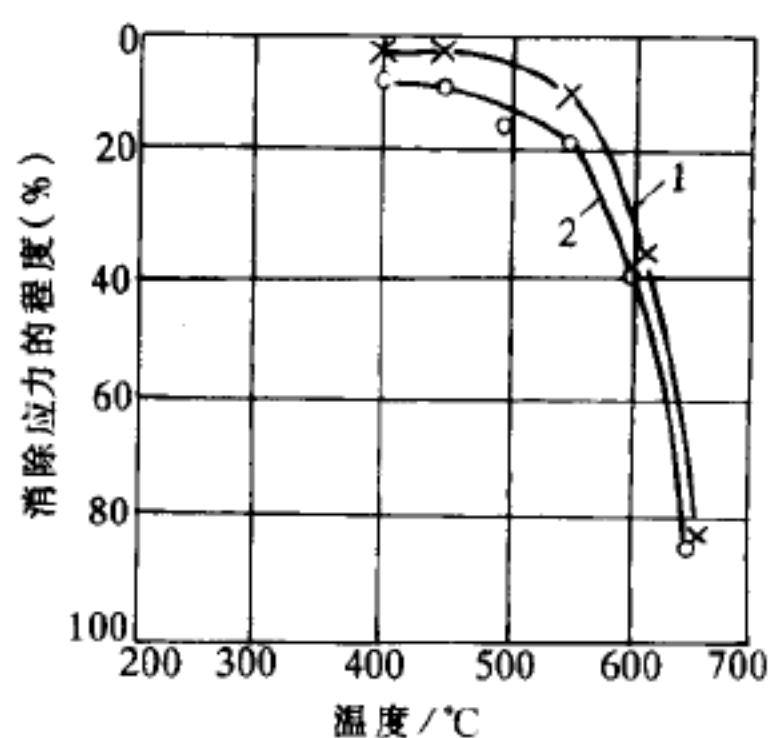


图 8-6 Ni-Cu-Cr 高合金灰铸铁(质量分数)(%)
(C2.16, Si2.08, Mn0.75, P0.84, Cu1.75, Cr7.11, Ni15, 19)
退火温度与残留内应力的关系
1—原始应力低 2—原始应力高

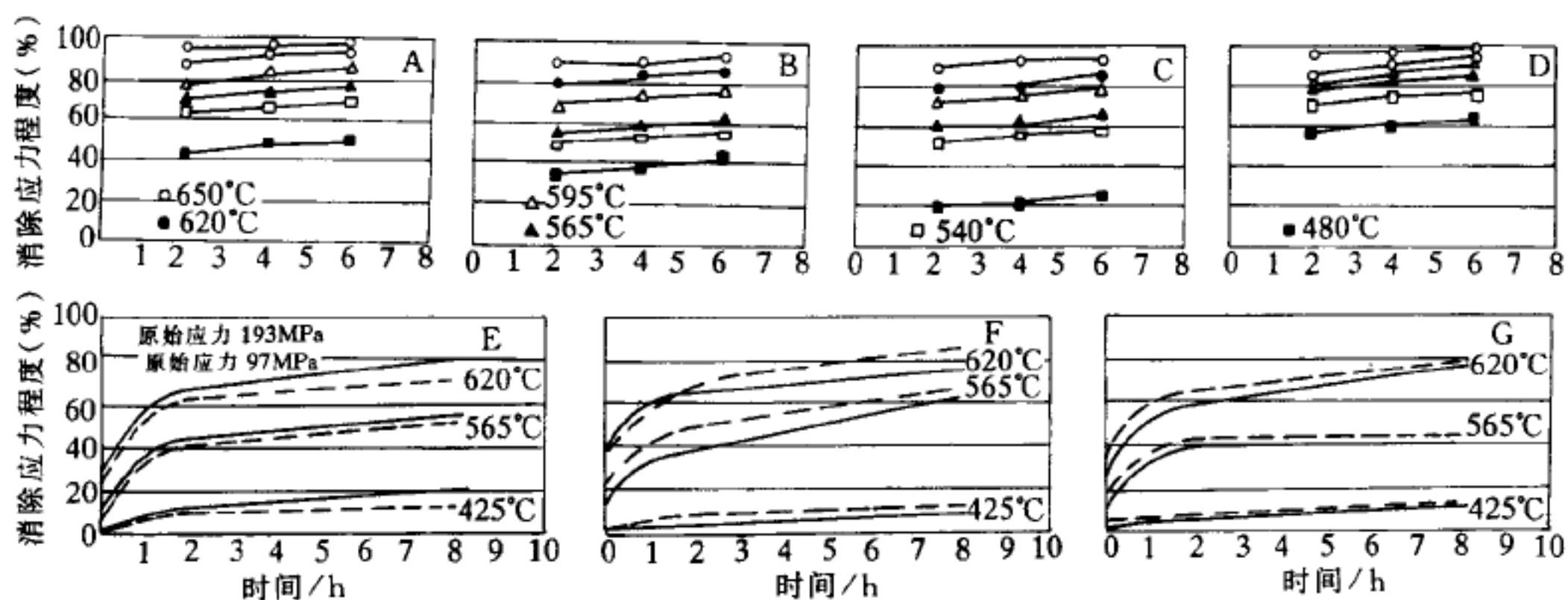


图 8-7 退火温度和时间与残留内应力的关系

图 8-7 中铸铁的化学成分

铸铁	化学成分(质量分数)(%)									
	C	Si	P	S	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	V
A	2.93	2.14	0.110	0.57	0.47	0.35	0.10	—	—	—
B	3.43	2.42	0.104	0.70	0.81	0.34	0.18	0.23	—	—
C	3.24	2.55	0.107	0.62	0.87	0.51	0.20	0.22	—	—
D	3.91	1.43	0.540	0.25	0.32	1.56	0.06	—	—	—
E	3.18	2.13	0.730	0.125	0.70	1.03	0.33	0.65	—	—
F	3.12	1.76	0.075	0.097	0.78	1.02	0.41	0.58	—	—
G	2.78	1.77	0.069	0.135	0.55	0.36	0.10	0.33	0.46	0.04

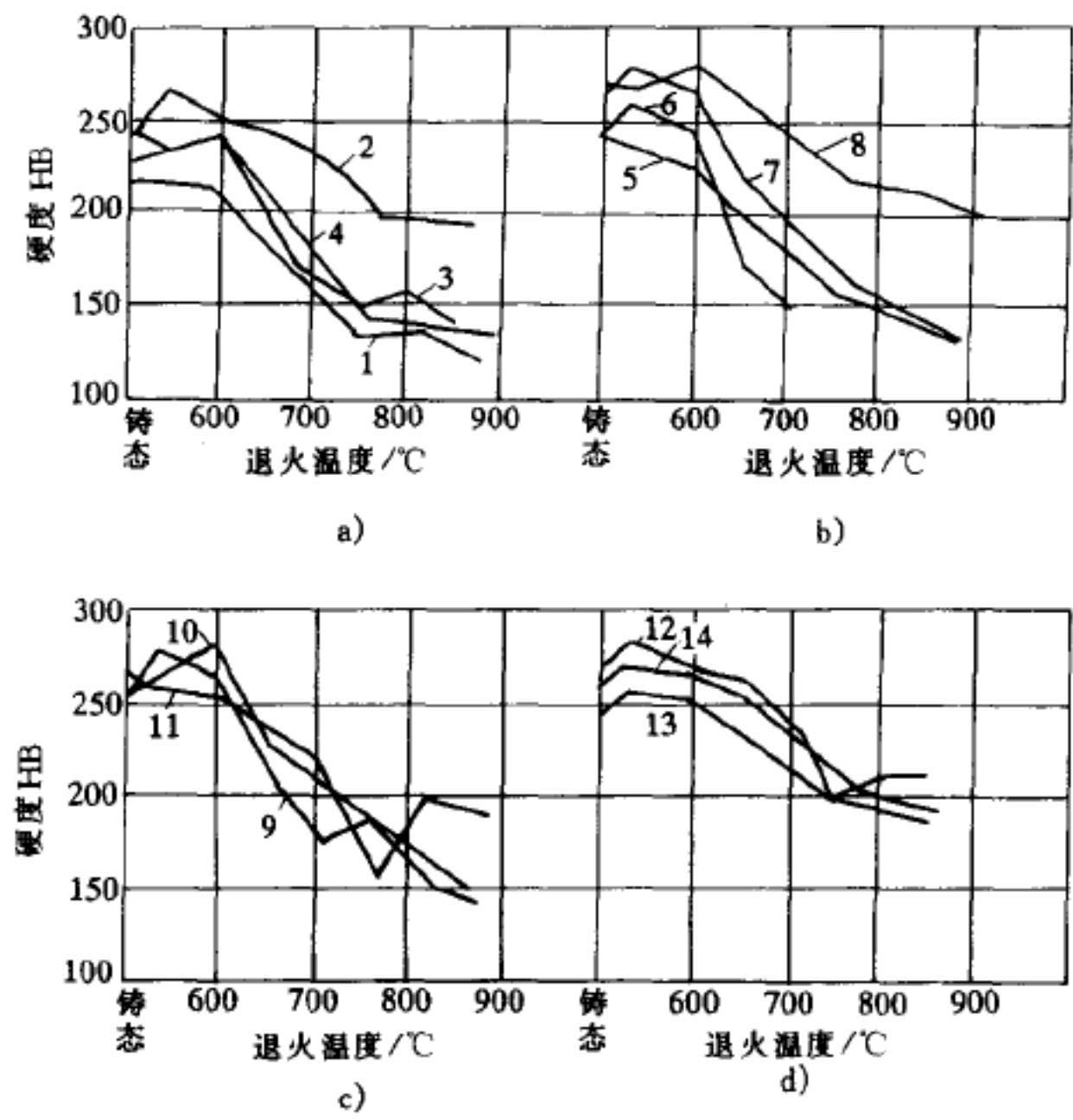


图 8-8 灰铸铁硬度随退火温度的变化

1—C3.28, Si1.93, Mn0.96, S0.03, P0.11 2—Cr0.56, 其他成分与 1 同, 以下同此 3—Ni1.72 4—Mo0.47 5—V0.12 6—Cu1.80
7—Mo0.54, Ni0.66 8—Mo0.56, Cr0.61 9—Mo0.54, Cu0.65 10—Mo0.47, V0.13 11—Cr0.49, Ni1.45 12—Cr0.49,
Mo 0.43, Ni1.45 13—Cr0.50, Cu0.52 14—Cr0.47, Mo0.43, Cu0.52(成分含量均为质量百分数)

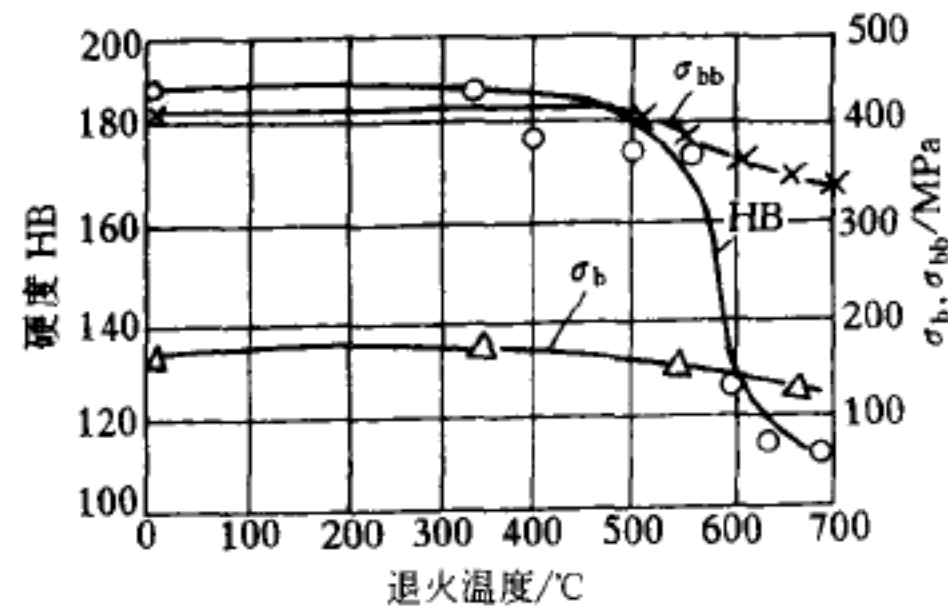
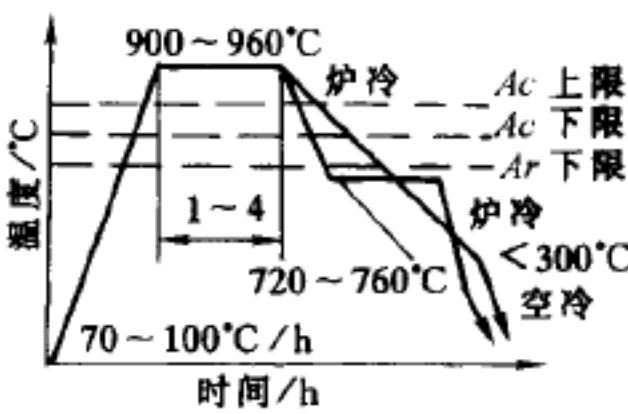
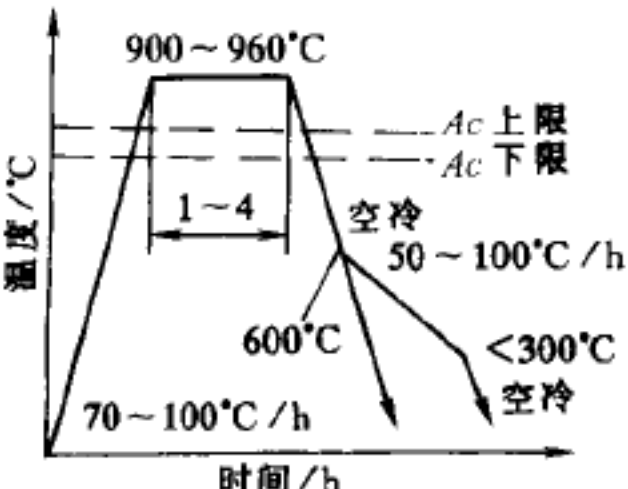


图 8-9 灰铸铁(C3.61, Si2.00, Mn0.35, S0.118, P0.35)(成分均为质量百分数)
退火温度与力学性能的关系(退火 3h)

表 8-15 灰铸铁石墨化退火工艺规范

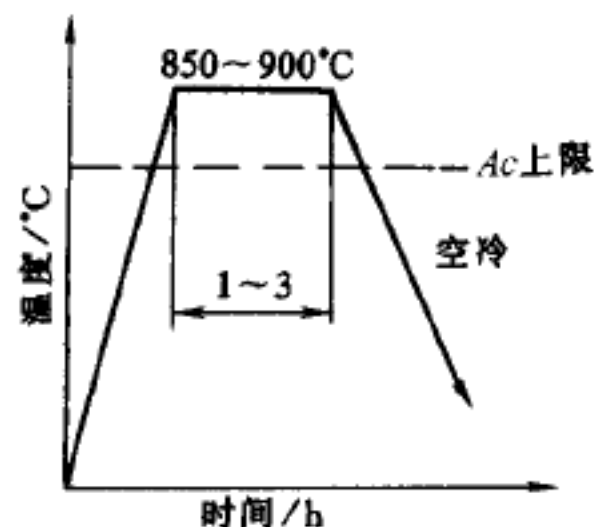
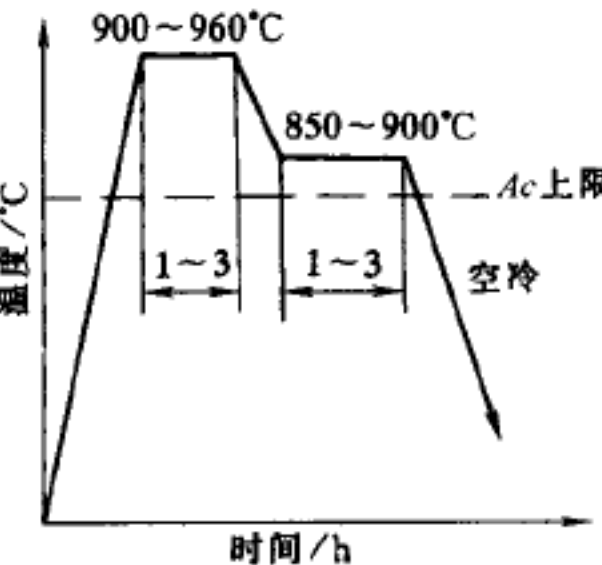
热处理分数	热处理目的	热处理规范	金相组织	备 注
低温石墨化退火	使共析渗碳体石墨化与粒化,从而使铸铁硬度降低,提高塑性和韧性,改善可加工性		铁素体 + 石墨或铁素体 + 珠光体 + 石墨	

(续)

热处理分数	热处理目的	热处理规范	金相组织	备 注
高温石墨化退火	消除自由渗碳体并降低硬度、提高塑性和韧性,改善可加工性		铁素体 + 石墨或铁素体 + 珠光体 + 石墨	适于铁素体基体的灰铸铁
高温石墨化退火	消除自由渗碳体并降低硬度、提高塑性和韧性,改善可加工性		珠光体 + 石墨	适于珠光体基体的灰铸铁

(2) 正火(表 8-16 ~ 表 8-22, 图 8-10 ~ 图 8-14)

表 8-16 灰铸铁正火工艺规范

热处理目的	热处理规范	金相组织	备 注
提高硬度、强度性能,并具有一定的塑性和韧性,提高耐磨性		珠光体 + 少量铁素体 + 石墨	形状复杂的或较重要的铸件正火处理后,需再进行消除内应力退火 适于铸态组织中存在自由渗碳体的含量在允许范围者
提高硬度、强度性能并具有一定的塑性和韧性,提高耐磨性		珠光体 + 少量铁素体 + 石墨	如铸铁组织中存在过量的自由渗碳体,应先进行高温石墨化,以消除自由渗碳体

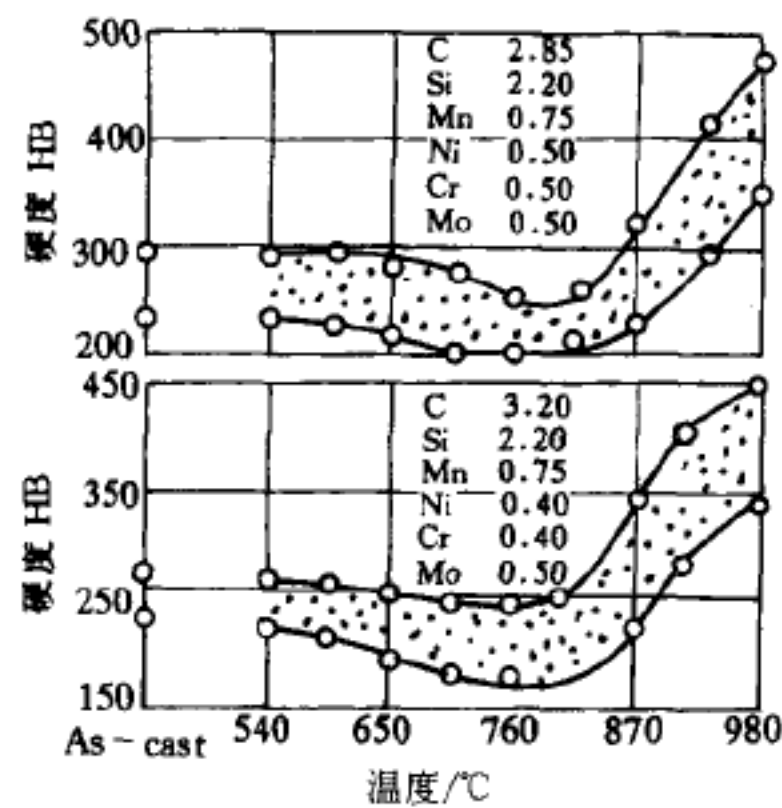


图 8-10 正火温度对灰铸铁硬度的影响
(灰铸铁成分均为质量百分数)

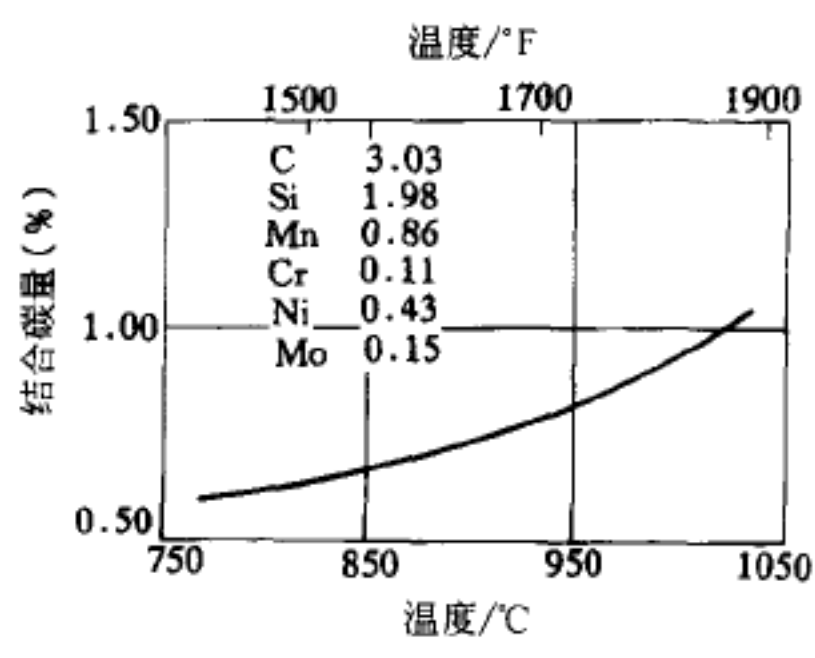


图 8-11 奥氏体化温度对淬火后灰铸铁中结合碳量的影响
(成分为质量百分数)

(3) 淬火、回火

表 8-17 奥氏体化温度对灰铸铁淬火后(油淬)硬度的影响

灰铸铁	铸 态	HBW			
		790℃	815℃	845℃	870℃
A	217	159	269	444	477
B	255	207	444	514	601
C	223	311	477	486	529
D	241	355	469	486	460
E	235	208	487	520	512
F	235	370	477	480	465

表 8-18 表 8-17 中几种铸铁的化学成分

铸 铁	成分(质量分数)(%)								
	TC(a)	CC(b)	Si	P	S	Mn	Cr	Ni	Mo
A	3.19	0.69	1.70	0.216	0.097	0.76	0.03	—	0.013
B	3.10	0.70	2.05	—	—	0.80	0.27	0.37	0.45
C	3.20	0.58	1.76	0.187	0.054	0.64	0.005	Trace	0.48
D	3.22	0.53	2.02	0.114	0.067	0.66	0.02	1.21	0.52
E	3.21	0.60	2.24	0.114	0.071	0.67	0.50	0.06	0.52
F	3.36	0.61	1.96	0.158	0.070	0.74	0.35	0.52	0.47

表 8-19 几种灰铸铁试样的成分

编 号	化学成分(质量分数)(%)							
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
1	3.05	2.30	0.50	0.09	0.21	—	—	—
2	2.86	2.27	0.50	0.09	0.14	0.70	1.71	—
3	2.85	2.51	0.65	0.06	0.13	0.35	—	—
4	2.86	2.37	0.61	0.06	0.12	—	—	0.69
5	2.86	2.23	0.45	0.12	0.15	0.96	3.00	—
6	2.85	2.24	0.45	0.06	0.13	—	1.30	0.90

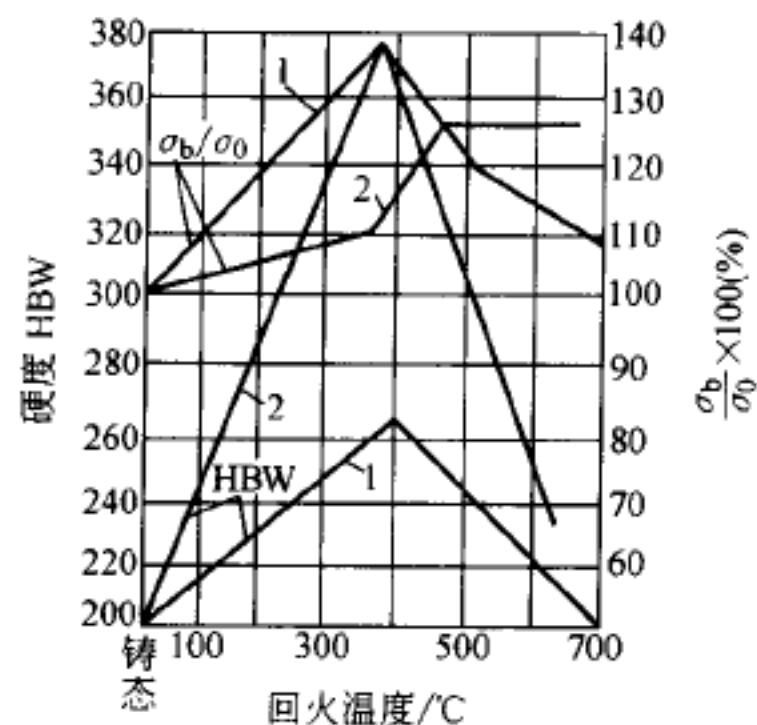


图 8-12 铸铁($w_{Si}1.65\%$ $w_C3.35\%$)淬火后的回火温度对力学性能的影响
1—816℃水淬 2—870℃水淬
 σ_0 —铸态的抗拉强度

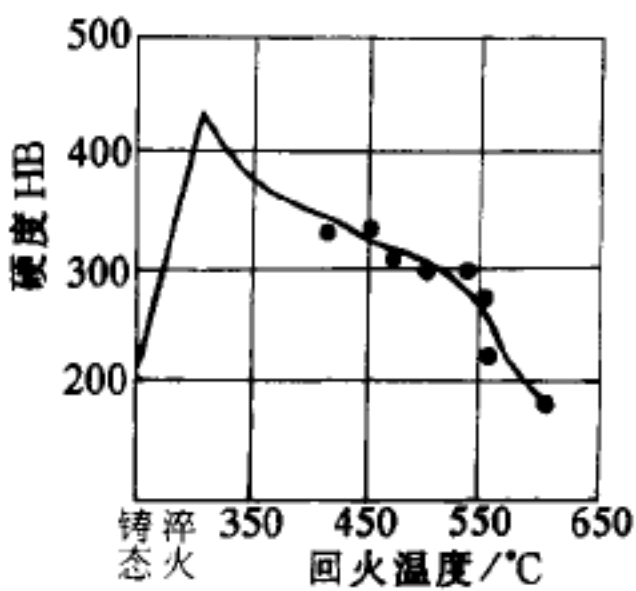


图 8-13 高磷灰铸铁
($w_C2.8\% \sim 3.4\%$, $w_{Si}1.22\% \sim 1.61\%$,
 $w_{Mn}1.06\% \sim 1.42\%$, $w_S0.09\% \sim 0.14\%$
 $w_P0.43\% \sim 0.60\%$)淬火回火后的硬度变化
(淬火温度 860 ~ 880℃)

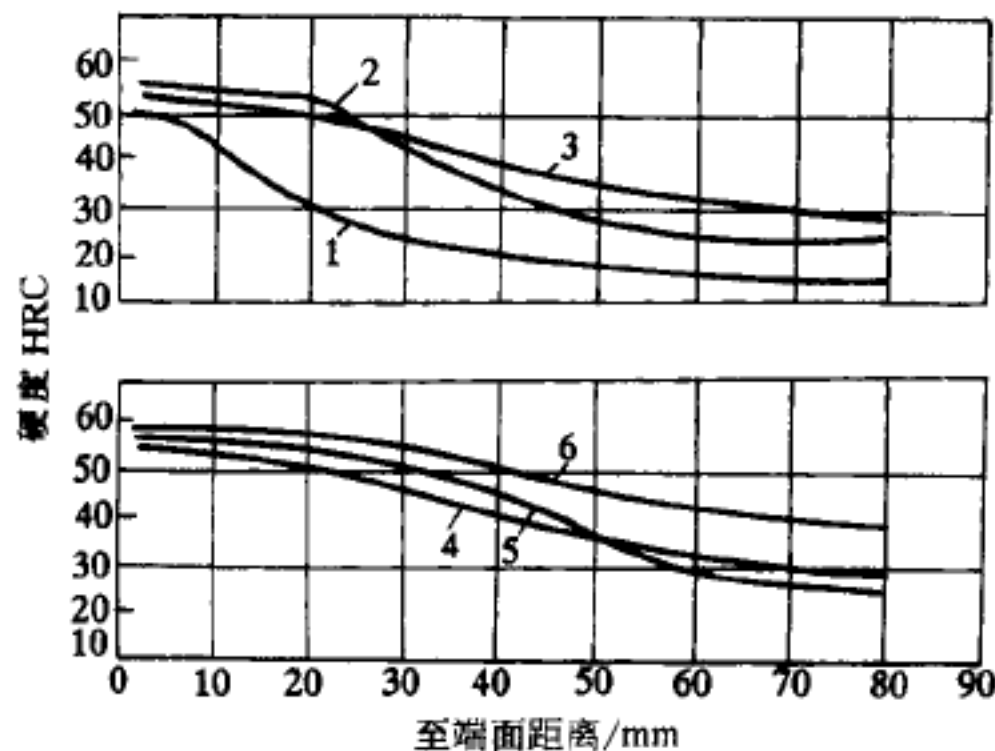


图 8-14 灰铸铁的端淬试验曲线
(试样编号 1 ~ 6 与化学成分见表 9-19)

表 8-20 灰铸铁淬火、回火工艺规范

淬火与回火	提高铸件的硬度和强度,提高耐磨性		回火索氏体 + 石墨	对于形状复杂或大件铸件升温必须缓慢,大型铸件要在 500 ~ 600℃ 预热后再移入高温炉中,以减少由于加热不均匀而造成开裂
			回火托氏体 + 回火索氏体 + 石墨	
			回火托氏体 + 石墨(此时抗拉强度最大)	

(续)

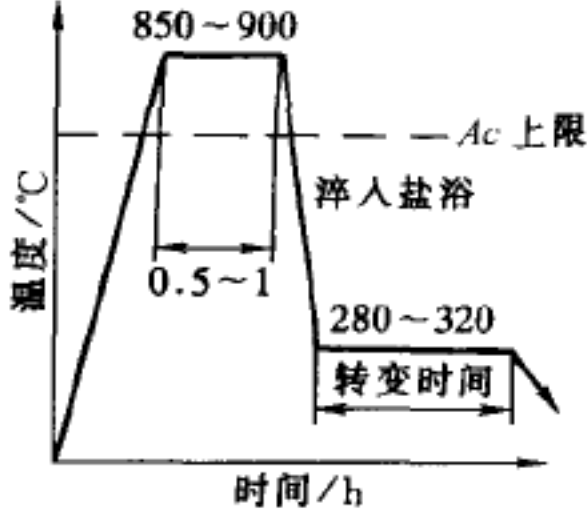
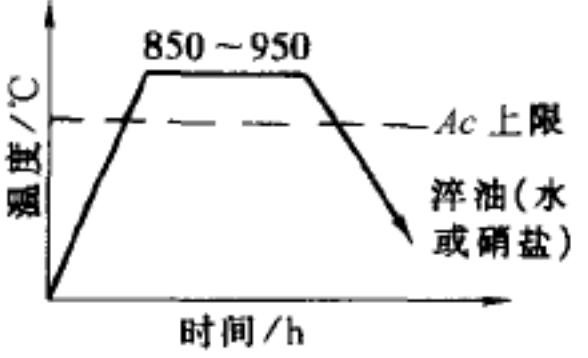
等温淬火	提高铸件的综合力学性能(特别是塑性和韧性)和耐磨性,并减小变形量		下贝氏体 + 残留奥氏体 + 石墨	等温淬火的冷却介质为硝盐或热油,等温保持时间视材料的奥氏体等温转变图而定(一般多选用 0.5 ~ 1h)
表面淬火	提高铸铁件表面硬度、耐磨性和疲劳强度		铸件内部保持淬火前的原始组织,表层一定深度为: 马氏体 + 残留奥氏体 + 石墨	加热方式有: 1. 火焰加热 2. 感应加热(高频) 3. 接触电阻加热(工频) 为保证心部力学性能及表面能获得较高硬度,可进行正火或调质等预备热处理

表 8-21 等温温度与灰铸铁的力学性能

等温温度 /℃	铸铁成分(质量分数)(%)							
	C _总 2.83, C _灰 0.7, Cr0.19, Si1.90		C _总 2.83, C _灰 0.7, Cr0.15, Mo0.50, Si1.92		C _总 2.82, C _灰 0.71, Cr0.14, Mo0.24, Si1.20		C _总 3.56, C _灰 0.66, Si2.08	
	σ_{bb} /MPa	HB	σ_{bb} /MPa	HB	σ_{bb} /MPa	HB	σ_{bb} /MPa	HB
铸态	593	229	734	251	711	240	615	255
250	358	492	432	515	410	507	407	470
300	898	332	1070	386	1010	388	697	346
350	860	317	884	340	942	334	644	282
500	702	286	698	314	733	290	680	299
600	659	237	758	265	745	252	718	273

表 8-22 常用表面淬火工艺

方 法	工 艺 特 点
火焰加热淬火	用氧乙炔焰加热表面到淬火温度(约 900~1000℃),喷水冷却,或将零件投入淬火槽。淬硬层深度 2~6mm,硬度 40~48HRC。如床身,长 2.5~3m,淬硬深度 3~5mm 时,变形 0.3~0.4mm,磨削后可消除。简便,但温度难控制,过热淬火后变形大。适于单件或小批生产的大工件
感应加热淬火	<p>1. 中频感应加热淬火 常用频率 2500~8000Hz。工件表面被快速加热到淬火温度后,喷水或浸液,淬硬层较深。淬硬层约 3~5mm,硬度 >50HRC。调节阳极电流、频率和加热时间,可以控制淬火温度和深度。淬火质量稳定,工件变形较小。适用于大件、中件、小件</p> <p>2. 高频感应淬火 常用频率 200~300kHz。加热速度 200~1000℃/s。淬硬层浅。淬硬层约 1~2mm。淬火温度 850℃,表面硬度可达 50HRC 以上;淬火温度 900~1000℃,表面硬度可达 60HRC。淬火质量稳定,氧化脱碳少,工件变形小。适用于套筒类工件、齿轮、机床导轨等</p>
接触电阻加热自冷淬火	<p>1. 碳棒电极手工操作 二次开路电压 2~3V,短路电流 80~160A,电极接触端 1~2mm²,移动速度 2~3 圈/s,每圈直径 3~5mm。淬硬层深度 0.07~0.13mm,硬度 54HRC 以上</p> <p>2. 铜滚轮机动操作 二次开路电压 <5V,短路电流 500~600A,滚轮与导轮面接触压力 20~30N,滚轮线速度 2~3m/min。淬硬层深度 0.2~0.25mm,硬度 54HRC 以上</p>

8.3 可锻铸铁成分、热处理工艺和性能

1. 可锻铸铁的成分与性能(表 8-23 ~ 表 8-32)

表 8-23 黑心可锻铸铁、珠光体可锻铸铁及白心可锻铸铁的牌号和力学性能(GB/T9440—1988)

种类	牌 号		试样直径 d /mm	抗拉强度 σ_b	屈服强度 $\sigma_{0.2}$	伸长率 $\delta(\%)$ ($L_0 = 3d$)	硬 度 HBW
	A	B		/MPa			
				\geq			
黑心可 锻铸铁	KTH300—06	KTH330—08 KTH370—12	12 或 15	300	—	6	≤ 150
	300			—	8		
	KTH350—10			350	200	10	
	370				12		
珠光体 可锻铸铁	KTZ450—06	12 或 15	12 或 15	450	270	6	150 ~ 200
	KTZ550—04			550	340	4	180 ~ 230
	KTZ650—02			650	430	2	210 ~ 260
	KTZ700—02			700	530	2	240 ~ 290
白心 可锻铸铁	KTB350—04	9 12 15	340 350 360	—	5	≤ 230	
				—	4		
				—	3		

(续)

种类	牌号		试样直径 d /mm	抗拉强度 σ_b	屈服强度 $\sigma_{0.2}$	伸长率 $\delta(\%)$ ($L_0 = 3d$)	硬度 HBW
	A	B		/MPa			
				\geq			
白心 可锻铸铁	KTB380—12		9	320	170	15	≤ 200
			12	380	200	12	
			15	400	210	8	
	KTB400—05		9	360	200	8	≤ 220
			12	400	220	5	
			15	420	230	4	
	KTB450—07		9	400	230	10	≤ 220
			12	450	260	7	
			15	480	280	7	

注: 1. 黑心和珠光体可锻铸铁, 试样直径 12mm 只适用于主要壁厚 $< 12\text{mm}$ 的铸件。牌号 KTH300—06 适于气密性零件。B 系列为过渡牌号。

2. 白心可锻铸铁, 试样直径由供需双方按铸件壁厚协议, 应尽量与铸件主要壁厚相近。牌号 KTB380—12 适于要求强度和焊接后不热处理的零件。

表 8-24 牌号黑心可锻铸铁的化学成分

种类	牌号		成分(质量分数)(%)				
	A	B	C	Si	Mn	p ^①	S
一般	KTH300—06	KTN330—08	2.7~3.1	0.7~1.1	0.3~0.6	<0.2	0.18
	2.5~2.9		0.8~1.2	0.3~0.6	<0.2	0.18	
	KTH350—10		2.4~2.8	0.9~1.4	0.3~0.6	<0.2	0.12
	KTH370—12		2.2~2.5	1.0~1.5	0.3~0.6	<0.2	0.12
Al-Bi 孕育处理	KTH300—06	KTN330—08	2.7~2.9	1.3~1.5	0.4~0.6	<0.12	≤0.20
	2.6~2.8		1.4~1.6	0.4~0.6	<0.12	≤0.18	
	KTH350—10		2.4~2.6	1.5~1.7	0.4~0.6	<0.12	≤0.12
	KTH370—12		2.3~2.5	1.6~1.8	0.4~0.6	<0.12	≤0.10

① 宜控制 $w_P \leq 0.1\%$ 。

表 8-25 珠光体可锻铸铁的基本成分

国别	成分(质量分数)(%)					备注
	C	Si	Mn	P	S	
美国	2.0~2.9	0.9~1.9	0.2~1.3	0.02~0.20	0.05~0.20	典型成分
中国	2.3~2.8	1.3~2.0	0.4~0.6	< 0.10	< 0.20	通用
	2.3~2.6	1.3~1.6	0.4~0.7	< 0.10	< 0.16	常用

表 8-26 白心可锻铸铁的化学成分

类型	成分(质量分数)(%)					
	C	Si	Mn	P	S	Cr
国外白心可锻铸铁	2.6~3.4	0.4~1.2	< 0.6	< 0.2	< 0.3	< 0.15
常用成分	2.8~3.4	0.7~1.1	0.4~0.7	< 0.2	< 0.2	
冲天炉熔炼	2.8~3.2	0.6~1.15	≤ 0.60	≤ 0.20	≤ 0.10	≤ 0.04
感应电炉熔炼	2.6~3.4	0.6~1.2	≤ 0.50	≤ 0.20	≤ 0.10	≤ 0.03
感应电炉熔炼	2.3~3.1	0.7~1.4	≤ 0.60	≤ 0.15	≤ 0.10	≤ 0.03

表 8-27 球墨可锻铸铁的化学成分

种 类	成分(质量分数)(%)						应用
	C	Si	Mn	P	S	Mg, RE	
低碳球墨可锻铸铁	2.0~2.4	1.2~2.2	一般 0.1~0.6; 铁素体, Mn 宜低; 珠光体 Mn 宜高	<0.1 宜<0.08	可<0.1 宜<0.06	Mg0.03~0.05 RE0.03~0.06	采用较少
中碳球墨可锻铸铁	2.4~2.8						常用
高碳球墨可锻铸铁	2.8~3.2						薄壁铸件
超高碳球墨可锻铸铁	3.2~3.6	1.8~2.2	0.3~0.6	0.1 宜<0.08	<0.08	①	薄壁铸件
奥贝球墨可锻铸铁 下贝氏体球墨可锻铸铁	3 左右	1.8 左右	可放宽到<0.7	可放宽到 <0.1	S 可放宽; Bi 可放宽 到 0.5	②	齿轮、受力 零件、抗 磨件

① 球化剂 REMgSiFe(成分为质量百分数): RE7, Mg 8, Si40。加入量 1.2~1.4。

② 球化剂 REMgSiFe(成分为质量百分数): RE5.7, Mg 9.2, Si43, Ca 1.4, 加入量 1.5。

表 8-28 黑心可锻铸铁的静载性能

牌 号	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	抗弯强度 σ_{bb} /MPa	抗压强度 σ_{bc} /MPa	抗扭强度 MPa	抗剪强度 MPa	伸长率 δ /GPa	弹性模量 E /GPa	泊松比	硬度 HBW
KTH300—06	300	190	481	—	333	265	6	155	0.25 ~ 0.28	≤150
KTH330—08	330	210	520	—	338	284	8	160		≤150
KTH350—10	350	220	559	1432	343	294	10	166		≤150
KTH370—12	370	230	569	—	363	294	12	170		≤150

表 8-29 可锻铸铁件的特性和用途

类型	牌 号	特 性 及 用 途
黑心可 锻铸件	KTH300—06	有一定的韧性和适度的强度, 气密性好; 用于承受低动载荷及静载荷、要求气密性好的工作零件, 如管道配件(弯头、三通、管件)、中低压阀门以及瓷绝缘子铁帽等
	KTH330—08	有一定的韧性和强度, 用于承受中等动载荷和静载荷的工作零件, 如农机上的犁刀、犁柱、车轮壳, 机床用的钩形扳手、螺钉扳手, 铁道扣板, 输电线路上的线夹本体及压板等
	KTH350—10 KTH370—12	有较高的韧性和强度, 用于承受较高的冲击、振动及扭转负荷下工作的零件, 如汽车、拖拉机上的前后轮壳、差速器壳、转向节壳, 农机上的犁刀、犁柱, 船用电机壳, 瓷绝缘子铁帽等
珠光体 可锻铸件	KTZ450—06 KTZ550—04 KTZ650—02 KTZ700—02	韧性较低, 但强度大、硬度高、耐磨性好, 且可切削性良好; 可代替低碳、中碳、低合金钢及非铁合金制造承受较高的动、静载荷, 在磨损条件下工作并要求有一定韧性的重要工作零件, 如曲轴、连杆、齿轮、摇臂、凸轮轴、万向接头、活塞环、轴套、犁刀、耙片等

(续)

类型	牌 号	特 性 及 用 作
白 心 可 锻 铸 铁	KTB350—04 KTB380—12 KTB400—05 KTB450—07	白心可锻铸铁的特性是①薄壁铸件仍有较好的韧性。②有非常优良的焊接性,可与钢钎焊。③可加工性好;但工艺复杂、生产周期长、强度及耐磨性较差,适于铸造厚度在 15mm 以下的薄壁铸件和焊接后不需进行热处理的铸件。在机械制造工业上很少应用这类铸铁

表 8-30 珠光体可锻铸件的静载性能

牌 号	抗弯强度 σ_{bb} /MPa	抗压强度 σ_{bc} /MPa	抗扭强度 /MPa	抗剪强度 /MPa	弹性模量 E /GPa	切变模量 /GPa	泊松比
KTZ450—06	598	1353 ~ 2001	441	314	155.4 ~ 177.9	69.6	0.26 ~ 0.28
KTZ550—04	706	1353 ~ 2001	510	253		69.6	
一般		1342 ~ 3534	等于或稍 低于 σ_b	$\sigma_b \times$ (70% ~ 90%)		62.8 ~ 71.3	

表 8-31 球墨可锻铸铁的常温力学性能

金相组织 ^{①、⑤}	热处理规范	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ (%)	硬度 HBW	冲击韧度 a_K (无缺口) /J·cm ⁻²
F + SG ^②	930 ± 10℃/4 ~ 5h + 730 ± 10℃/ 6 ~ 8h	392 ~ 471	10 ~ 22	134 ~ 170	—
F + 少量粒状 P + SG ^③	950℃/2h + 730℃/4h + 空冷	530	17.3	125	154
65%P + 破碎 F + SG ^③	950℃/2h + 900℃/1h + 空冷 + 580℃/2h	740	8.1	216	94
90%P + 少量牛眼 F + SG ^③	950℃/2h + 900℃/1h + 空冷 + 580℃/4h	870	2.8	256	36
上 B + 30% ~ 40% 富碳 A + SG ^④	900 ± 10℃/2h + 370 ± 5℃/1.5h	≥ 1000	≥ 5	HRC 30 左右	> 50
下 B + 残留 A + SG ^④	900 ± 10℃/2h + 300℃ 以下等 温淬火	≥ 1200	≥ 2	HRC 45 左右	> 30

① F—铁素体,P—珠光体,B—贝氏体,A—奥氏体,SG—球状石墨。
② 化学成分(%):C2.8 ~ 3.2、Si1.6 ~ 2.2、Mn0.3 ~ 0.5、P≤0.09、S≤0.10、RE_残≥0.025、Mg_残≥0.03。
③ 化学成分(%):C3.20Si1.92、Mn0.554、P 0.044、S 0.021、RE_残 0.044、Mg_残 0.041。
④ 化学成分(%):C3 左右,Si1.8 左右,Mn<0.7,P<0.1,S 可稍宽,Bi<0.5。稀土(5.7)镁(8.2)钙(1.4)硅(43)铁球化处理。
⑤ 成分均为质量百分数。

表 8-32 可锻铸铁的物理性能

物 理 性 能	黑心可锻铸铁	珠光体可锻铸铁
密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	7.2~7.4	7.2~7.4
比热容 $c(21^\circ\text{C})/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$ $(0\sim100^\circ\text{C})/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$ $(425^\circ\text{C})/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	460 510.8 690	460 510.8 690
热导率 λ 室温 $(430^\circ\text{C})/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	71.2~55.7 57.8	51.9~46.1
线胀系数 $\alpha(20\sim200^\circ\text{C})/\times10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$	10~13	12~16
电阻率 $\rho(21^\circ\text{C})/\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 427 $^\circ\text{C}$	28~34 室温值的两倍	37~41 室温值的两倍
最大磁导率 $\mu_{\text{max}}(\mu\text{H}/\text{m}=\mu\text{T}\cdot\text{m}/\text{A})$	2890	540
饱和磁感强度 I_s/T	1.8	<1.8
磁滞损失 $P_H/\text{J}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{Hz})^{-1}$	690	1000~1650
剩余磁感 B_r/T	0.54	0.65~0.85
矫顽力 $H_c/\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$	183	597~1194

2. 可锻铸铁热处理工艺

(1) 退火(图 8-15 和图 8-16,表 8-33 ~ 表 8-38)

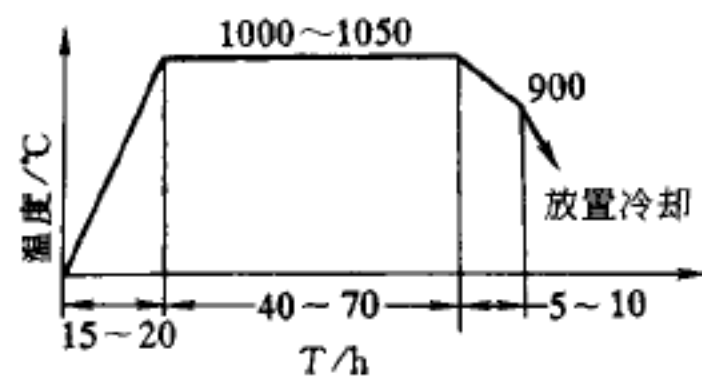


图 8-15 标准白心可锻铸铁的热处理工艺

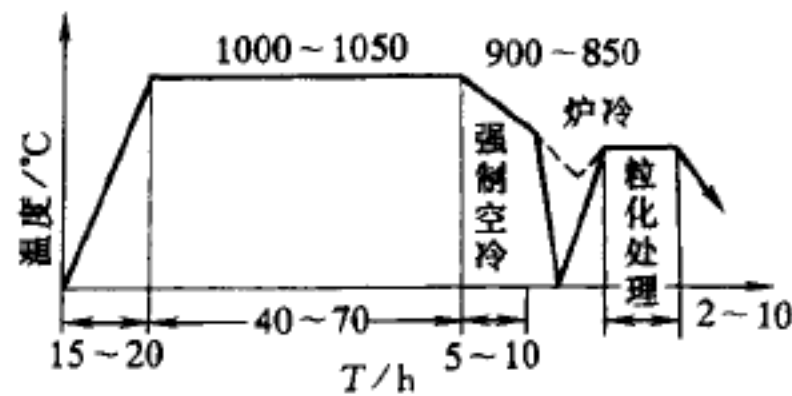
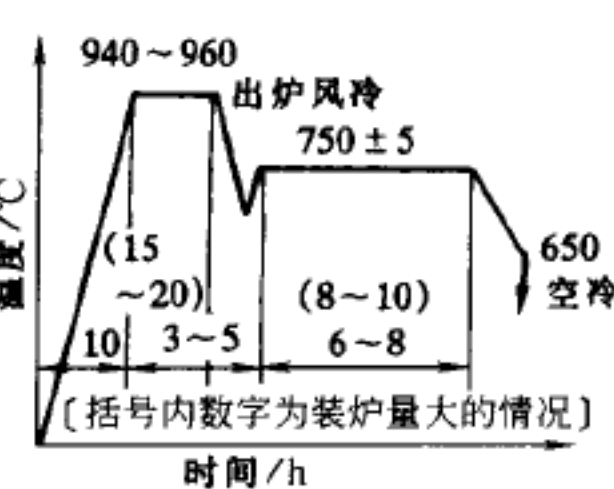


图 8-16 高强度白心可锻铸铁的热处理工艺

表 8-33 铁素体可锻铸铁石墨化退火工艺规范

化学成分(质量分数)(%)					孕育剂 (%)	退火炉型	退火工艺规范	相当于 GB/T9440 —1988 中牌号	典型产 品举例
C	Si	Mn	P	S					
2.55 ~ 2.76	1.2~ 1.6	0.35 ~ 0.50	< 0.10	< 0.12	B:0.002 ~0.003 Bi:0.007 ~0.01 Al:0.007 ~0.015	升降室 式电炉 (25t)		KTH 350—10	汽车底 盘 部分零件

(续)

化学成分(质量分数)(%)					孕育剂 (%)	退火炉型	退火工艺规范	相当于 GB/T9440 —1988 中牌号	典型产 品举例
C	Si	Mn	P	S					
2.3 ~ 2.6	1.6 ~ 1.9	0.4 ~ 0.6	<0.1	<0.2	Bi:0.004 ~0.006	连续式 煤粉火焰 反射隧道 炉(平均 产量 1t/ h)		KTH350 —10 KTH370 —12	汽车拖拉 机零件,铁路 零件,水暖管 件等
2.4 ~ 2.6	1.3 ~ 1.7	0.4 ~ 0.6	<0.10	<0.15	1号稀土 硅铁: 0.2~0.4 Bi:0.008 ~0.012 Al:0.005 ~0.010	室式燃 煤炉 4~ 10t		KTH350 —10 KTH370 —12	汽车零件: 钢板弹簧支 座,后桥壳差 速器壳 电力线路 金具:线夹、 挂板、铁帽
2.3 ~ 2.6	1.9 ~ 2.0	0.4 ~ 0.5	<0.07	<0.16	Bi:0.002 ~0.015	室式煤 炉 6~10t		KTH370 —12 KTH350 —10	铁路零件
2.5 ~ 2.7	1.6 ~ 1.9	Mn = 1.7S +0.2	<0.1	<0.2	Al:0.004 ~0.008 Bi:0.006 ~0.025	室式煤 炉 2t		KTH 370—12	汽车零件; 后桥壳、支 架、轮毂等 电力铁帽

表 8-34 白心可锻铸铁的脱碳方法

脱碳方法	氧化介质、炉气、退火参数
固体脱碳方法	固体氧化介质主要是铁矿石或氧化铁皮。粒度一般为 3~9mm,厚壁铸件可为 9~12mm。填料中配砂子 30%~50%,粒度 5~10mm 退火温度一般为 950~1050℃
气体脱碳法	炉内气氛的控制很重要,应由煤气发生炉供给煤气,并送入一定量的空气和蒸汽。炉气的组成一般如下: φ_{CO_2} 7%~10%, $\text{CO}/\text{CO}_2 = 2.5 \sim 3.5$, φ_{H_2} 20%~30%, $\varphi_{\text{H}_2\text{O}}$ 10%~20%, 其余 φ_{N_2} 退火温度一般为 1000~1050℃

表 8-35 生产白心可锻铸铁的退火工艺实例

化学成分(质量分数)(%)	脱碳剂	退火工艺	σ_b/MPa	$\delta(\%)$
C3.2~3.5, Si0.4~0.5, Mn0.4~0.5, P<0.25, S<0.25	赤铁矿 70% 建筑砂 30%	加热至 1080℃需时 24h 保温 70h 炉冷 20h 至 650℃出炉空冷	> 300	> 3
C2.8~3.2, Si0.4~0.6, Mn0.4~0.6, P<0.2, S<0.2	赤铁矿 60% 建筑砂 40%	加热至 960~980℃需时 24h 保温 40~50h, 炉冷 20h 至 650℃出炉空冷	> 350	> 3
C2.6~2.8, Si0.6~0.8, Mn0.6~0.8, P<0.15, S<0.15	赤铁矿 50% 建筑砂 50%	加热至 930~950℃需时 24h, 保温 40h, 炉冷 20h 至 650℃出炉空冷	> 450	> 5

表 8-36 珠光体可锻铸铁退火工艺规范

化学成分(质量分数)(%)					孕育剂 (%)	退火工艺规范	相当于 GB/T9440 —1988 中牌号	典型产品举例
C	Si	Mn	P	S				
2.4 ~ 2.8	1.0 ~ 1.3	0.85 ~ 1.25	< 0.10	≤ 0.15	—		KTZ450—06 KTZ550—04	台车轮、拖拉机链轨板、农机具零件等
2.3 ~ 2.5	1.3 ~ 1.6	0.4 ~ 0.6	< 0.10	< 0.16	—		KTZ650—02	旋转耕作机零件等
2.4 ~ 2.6	1.6 ~ 2.0	0.8 ~ 1.2	< 0.10	< 0.20	Bi:0.002 ~ 0.003		KTZ650—02	耕作易耗零件如犁刀、各种犁铧、方轴夹叉等

(续)

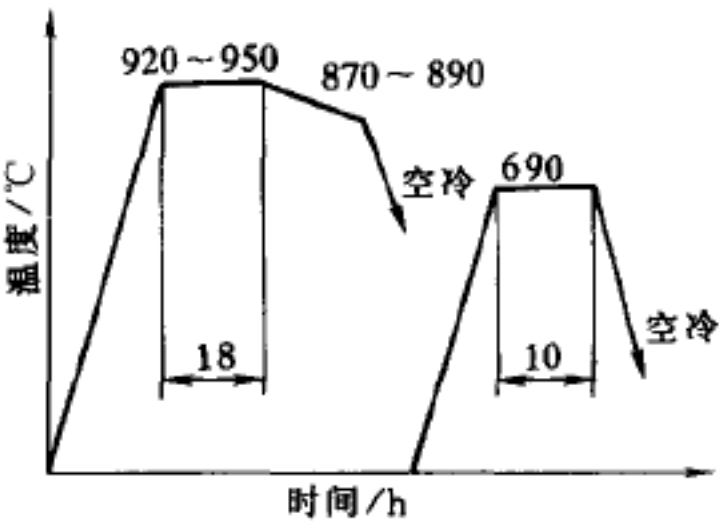
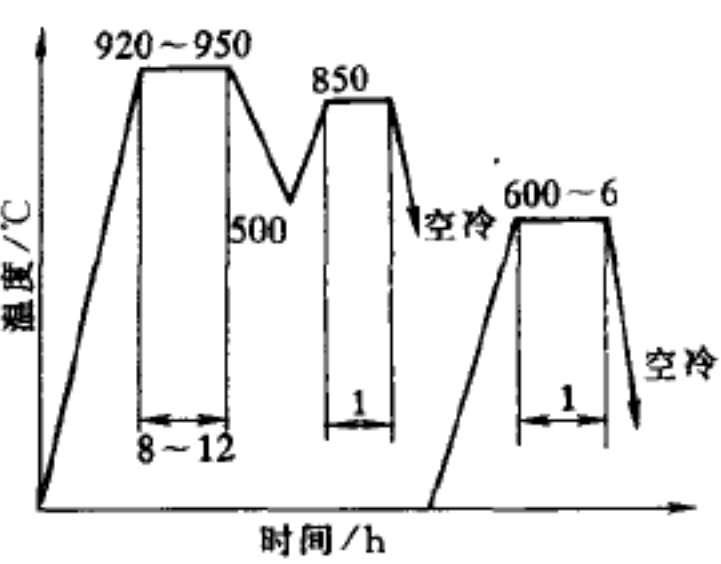
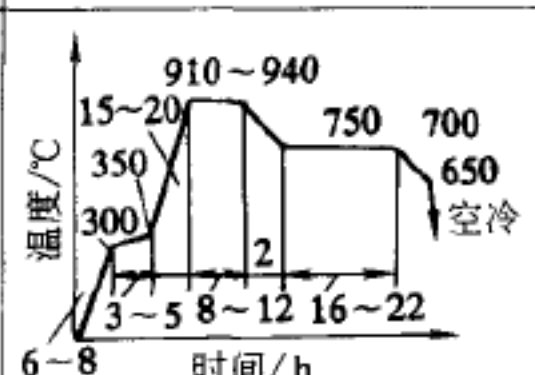
化学成分(质量分数)(%)					孕育剂 (%)	退火工艺规范	相当于 GB/T9440 —1988 中牌号	典型产品举例
C	Si	Mn	P	S				
2.4 ~ 2.6	1.3 ~ 1.5	0.84	0.028	0.173	—		KTZ650—02	手扶拖拉机 轴承座、插销、 耕作刀等
2.3 ~ 2.5	1.3 ~ 1.5	0.3 ~ 0.6	0.15 ~ 0.18	—	—		KTZ700—02	发动机连杆

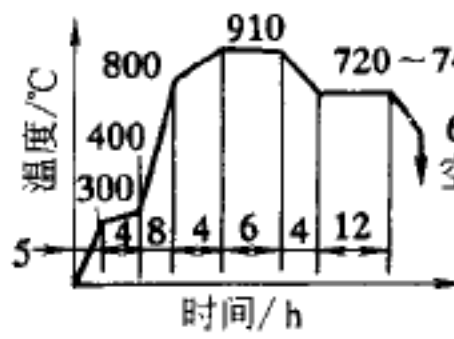
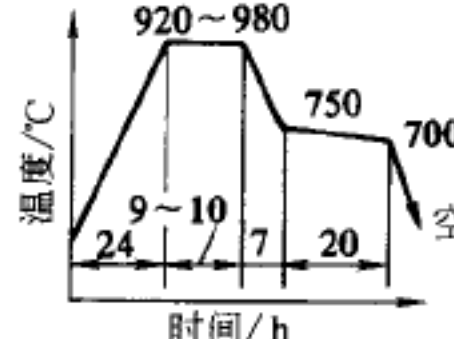
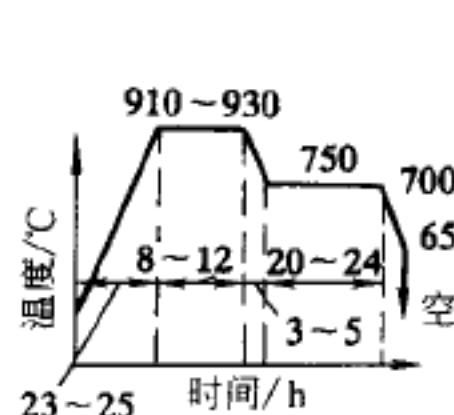
表 8-37 球墨可锻铸铁的退火工艺

方法	热处理规范及说明	金相组织	性能特点
铁素体化退火	小件、薄件 900 ~ 950℃/0.2 ~ 2.0h→720 ~ 750℃/2 ~ 4h(<5h)	1. 消除渗碳体、珠光体 2. 终组织:铁素体+球状石墨	强度较低,塑性高,韧性高,耐热疲劳,抗氧化、生长
	成分(质量分数)(%): C3.3 ~ 3.4, Si1.6 ~ 1.8, Mn<0.6, P<0.07, S<0.09 退火 L900℃/h→730℃/5h	终组织: 铁素体+球状石墨,无渗碳体	σ_b 327 ~ 437MPa, δ 5% ~ 1265
	水轮机转轮(壁厚差悬殊)成分(质量分数)(%): C3.4 ~ 3.8, Si2.0 ~ 2.5, Mn0.3 ~ 0.45, P0.08 ~ 0.20, S<0.02 退火: 920 ~ 940℃/2 ~ 4h, 炉冷(20 ~ 30℃/h), 740 ~ 760℃/4 ~ 6h, 600℃空冷	1. 铸态:莱氏体+渗碳体+少量珠光体+球状石墨 2. 退火后,铁素体+球墨石墨	σ_b 394 ~ 549MPa δ 8.0% ~ 19.7% α_K 31.4 ~ 58.8J/cm ²
石墨化退火	900 ~ 950℃/3 ~ 8h→600℃→空冷	1. 消除渗碳体 2. 终组织:珠光体+牛眼铁素体+球状石墨	强度,塑性韧性等综合性能较好

表 8-38 生产黑心可铸铁铁件的退火工艺实例

产品名称	化学成分(质量分数)(%)	孕育剂(%)	退火炉型	退火工艺	力学性能或牌号
电力线路的线夹、挂板、铁帽 汽车零件:钢板弹簧支座,后轮毂差速器壳等	C2.4 ~ 2.6, Si1.3 ~ 1.7, Mn0.40 ~ 0.60, S≤0.15, P<0.10, Cr<0.06	加入 1 号稀土硅 铁 0.2 ~ 0.4 w_{Bi} 0.008 ~ 0.012 w_{Al} 0.005 ~ 0.010	4 ~ 10t 箱式煤炉		KTH350—10 KTH370—12

(续)

产品名称	化学成分(质量分数)(%)	孕育剂(%)	退火炉型	退火工艺	力学性能或牌号
铁路零件	C2.3~2.6, Si1.9~2, Mn0.4~0.5 P<0.07, S<0.16, Mn=1.72S+0.075	w_{Bi} 0.002~0.015	6~10t 箱式煤炉		KTH370—12 KTH350—10
汽车零件：后桥壳、支架、轮毂 电力铁帽等	C2.5~2.7, Si1.6~1.9, Mn=1.7S+0.2, P<0.1, S<0.2	w_{Al} 0.004~0.008 w_{Bi} 0.006~0.025	20t 箱式煤炉		KTH370—12
汽车底盘零件，电力钢帽、铁路扣铁、底座等	C2.4~2.6, Si1.55~1.75, S≤0.2, P≤0.1, Cr<0.05, $\frac{Mn}{S}=2.5\sim3$, S0.2%以上用2.5倍, S0.2%以下用3倍	w_{Bi} 0.004~0.006 w_{Al} 0.015(加入量)	25t 台车煤粉炉		KTH370—12 (极少一部分) KTH350—10)

(2) 正火(表 8-39)

表 8-39 球墨可锻铸铁的正火工艺

方法	热处理规范及说明	金相组织	性能特点
高温石墨化+正火	小型车床齿轮 原铁液(质量分数)(%)：C2.8~3.2, Si1.6~2.2, Mn0.3~0.5, P≤0.09, S≤0.1 930±10℃/4~5h, 850℃空冷, 580±10℃/3~4h	1. 消除渗碳体 2. 终组织：珠光体+少量牛眼铁素体+球状石墨	强度高，塑性、韧性较好，耐磨 $\sigma_b \geq 600\text{MPa}$ $\delta \geq 2\%$
高温石墨化+部分奥氏体化正火	900~950℃/3~8h→800~820℃/0.5~1.5h→600~620℃/1~1.5h→空冷	1. 消除渗碳体、磷共晶 2. 终组织：珠光体+少量破碎铁素体+球状石墨	强度高，塑性、韧性较好，耐磨

(3) 淬火(表 8-40)

表 8-40 球墨可锻铸铁的等温淬火

方法	热处理规范及说明	金相组织	性能特点、应用
高温石墨化+上贝氏体等温淬火	一般 900~950℃/3~8h→快冷至 350~380℃/1~3h→空冷或水冷	1. 消除渗碳体 2. 终组织：上贝氏体+残留奥氏体+球状石墨	高强度、硬度，高塑性、韧性，抗疲劳，耐磨
	例1 900±10℃/2h→等温淬火 370±5℃/1.5h 例2 白口毛坯完全石墨化退火，获得铁素体基体，切削加工后，再等温淬火	1. 消除渗碳体 2. 终组织：上贝氏体+富碳奥氏体 30%~40%+球状石墨	用于齿轮、重要受力零件、抗磨零件等
	一般：900~950℃/3~8h→快冷至 280~320℃/0.75~3h→空冷或水冷 例：900±10℃/2h+等温淬火 <300℃	1. 消除渗碳体 2. 终组织：下贝氏体+少量马氏体+残留奥氏体+球状石墨	更高强度、硬度，一定塑性、韧性，抗疲劳，耐磨 齿轮、重要受力零件等

8.4 球墨铸铁成分、热处理工艺和性能

1. 球墨铸铁成分与性能(表 8-41 ~ 表 8-45)

表 8-41 铁素体和珠光体球墨铸铁的化学成分

铸铁种类		化学成分(质量分数)(%)								
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Mo	Mg	RE
铁素体	铸态	3.5~4.0 宜≤3.9	2.5~3.0	≤0.4 宜≤0.3 国外≤0.2	≤0.07 国外≤0.05	≤0.02		不宜含 V、Ti、Cu、 W、Mo、Cr 等	0.03~0.06	0.02~0.04
	退火	3.5~4.0 宜≤3.9	2.0~2.7	≤0.6	≤0.07	≤0.02			0.03~0.06	0.02~0.04
	低温工 作铸件	3.4~3.6	1.4~2.0	<0.3 宜≤0.2	≤0.04 宜<0.03	≤0.01	Ni <1.0		0.04~0.06	尽量不用
	大断面 铸件 ^②	3.3~3.6	2.0~2.4	0.1 甚至0.03	<0.04	<0.01				
铁素体 + 珠光体	铸态	3.5~3.8	2.2~2.7 宜≤2.5	<0.5	<0.07	≤0.02				
	退火	3.5~3.8	2.0~2.5	≤0.06	≤0.07	≤0.02				
珠光体 ^③	铸态	3.5~3.9 宜≤3.8	2.1~2.5 宜1.8 ~2.3 或>2.1 ^①	0.3~0.5	≤0.07	≤0.02	0.5~1.0	0~0.2		
	热处理	3.5~3.7	2.0~2.4	小件 0.4~0.8; 大件<0.5	≤0.07	≤0.02	0~1.0	0~0.2		
	大断面 铸件 ^②	3.6~3.8	2.0~2.4	<0.5 宜0.4	<0.07	<0.01	0.4~1.0	0.2~0.4		

① 若要求冲击韧度,则宜低 Si;非合金曲轴, w_{Si} 1.8%~2.3%;含铜合金曲轴, w_{Si} 1.8%~2.1%。

② 壁厚>100mm,称为大断面。杂质元素 Pb、Bi、As、Co、Cr、V、Ti、Zn、B 等,应尽量少。

③ 可加 w_{Sn} 0.05%~0.10%, w_{Ni} <1%。

表 8-42 贝氏体球墨铸铁的化学成分

铸铁名称		基本成分 ^① (%)	合金元素	备 注
奥贝球 墨铸铁	铸态	C3.5~3.8 Si2.4~3.4	Mo+Cu, Mo+Ni, Mo+Cu+Ni	通常余热处理或中、低温回火
	强制空冷	Mn<0.30 P<0.07	Mo, Mo+Cu, Mo+Ni Mo+Cu+Ni	
	盐浴等温淬火	S<0.02	Mo, Mo+Cu, Mo+Ni Mo+Cu+Ni	
下贝氏体 球墨铸铁	一般铸件	C3.5~3.8 Si2.4~3.4	Mn<0.5, 可以不加合金元素	
	重要中小件	Mn<0.30 P<0.07	Ni+Mo, Cu+Mo, Cu+Mo+V, Cu+V, V	Cu0~0.4, Mo0~0.2
	厚壁铸件	S<0.02		Cu0.5~0.8, Mo0.2~0.4

① 成分均为质量百分数,为推荐值。

表 8-43 球墨铸铁件的特性和用途举例

牌 号	基体组织	主要特性	用途举例
QT400—18 QT400—15	铁 素 体 (100%)	具有良好的焊接性和可加工性, 常温时冲击韧度高, 而且脆性转变温度低, 同时低温韧性也很好	农机具: 重型机引五铧犁、轻型二铧犁、悬挂犁上的犁柱、犁托、犁侧板、牵引架、收割机及割草机上的导架、差速器壳、护刃器 汽车、拖拉机、手扶拖拉机: 牵引框、轮毂、驱动桥壳体、离合器壳、差速器壳、离合器拨叉、弹簧吊耳、汽车底盘悬挂件 通用机械: 1.6 ~ 6.4MPa 阀门的阀体、阀盖、支架; 压缩机上承受一定温度的高低压气缸、输气管 其他: 铁路垫板、电动机机壳、齿轮箱、气轮壳
QT450—10	铁素体 ($\geq 80\%$)	焊接性、可加工性均较好, 塑性略低于 QT400—18, 而强度与耐小能量多次冲击能力优于 QT400—18	内燃机的机油泵齿轮, 汽轮机中温气缸隔板, 水轮机的阀门体, 铁路机车车辆轴瓦, 机器座架、传动轴、链轮、飞轮, 电动机架, 千斤顶座等
QT500—7	珠光体 + 铁素体 ($< 80\% \sim 50\%$)	具有中等强度与塑性, 切削性尚好	内燃机: 5 ~ 4000HP 柴油和汽油机的曲轴、部分轻型柴油机和汽油机的凸轮轴、气缸套、连杆、进排气门座 农机具: 脚踏脱粒机齿条、轻负荷齿轮、畜力犁铧 机床: 部分磨床、铣床、车床的主轴 通用机械: 空调机、气压机、冷冻机、制氧机及泵的曲轴、缸体、缸套 冶金、矿山、起重机械: 球磨机齿轴、矿车轮、桥式起重机大小车滚轮
QT600—3	铁素体 + 珠光体 ($< 80\% \sim 0\%$)	中高强度, 低塑性, 耐磨性较好	农机具: 犁铧、耙片、低速农用轴承套圈 汽车: 弧齿锥齿轮、转向节、传动轴 拖拉机: 减速齿轮 内燃机: 凸轮轴、曲轴
QT700—2 QT800—2	珠光体或回火索氏体	有较高的强度、耐磨性, 低韧性(或低塑性)	
QT900—2	下贝氏体或回火马氏体、回火屈氏体	有高的强度、耐磨性、较高的弯曲疲劳强度、接触疲劳强度和一定的韧性	

表 8-44 球墨铸铁的常温力学性能

球墨铸铁 种类	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 σ_s /MPa	伸长率 δ (%)	弹性模量 /GPa	硬度 HBW	冲击韧度 a_k /J·cm ⁻²	热处理
铸态铁素体	450 ~ 550	280 ~ 400	10 ~ 20	160 ~ 170	140 ~ 190	50 ~ 150	铸态
退火铁素体	400 ~ 500	250 ~ 350	12 ~ 25	160 ~ 170	120 ~ 180	100 ~ 160	退火
铸态珠光体	600 ~ 750	400 ~ 500	2 ~ 4	170 ~ 180	217 ~ 269	15 ~ 35	铸态
正火珠光体	700 ~ 950	450 ~ 650	2 ~ 5	170 ~ 180	220 ~ 300	20 ~ 40	正火
铁素体 + 珠光体	500 ~ 600	350 ~ 420	5 ~ 10		147 ~ 241		铸态或正火
珠光体 + 分散分布铁素体	600 ~ 700	420 ~ 630	4 ~ 9		207 ~ 280	40 ~ 90	部分奥氏体化正火
回火马氏体	700 ~ 900		0.5 ~ 1.0		55 ~ 61HRC	5 ~ 30	淬火 + 低温回火
回火马氏体 + 回火索氏体	1000 ~ 1300				45 ~ 50HRC		淬火 + 回火
回火索氏体	700 ~ 1200	600 ~ 750	1 ~ 5		32 ~ 43HRC	20 ~ 60	淬火 + 高温回火
奥氏体	380 ~ 520	230 ~ 270	6 ~ 40 ^[1]	83 ~ 138	130 ~ 240	< 39	—
上贝氏体	800 ~ 1250	500 ~ 1000	3 ~ 18		30 ~ 50HRC	40 ~ 160	等温淬火
下贝氏体	1100 ~ 1600	800 ~ 1250	1 ~ 4		38 ~ 50HRC	30 ~ 100	等温淬火

表 8-45 球墨铸铁的疲劳性能与断裂韧度

球墨铸铁 的基体		抗拉强度 σ_b /MPa	无缺口试样		45°V 形缺口试样			断裂韧度④ K_{IC} /MPa \sqrt{m}
			疲劳极限 σ_{-1} /MPa	$\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_b}$	疲劳极限 σ_{-1K} /MPa	$\frac{\sigma_{-1K}}{\sigma_b}$	缺口敏感系数 $\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1K}}$	
铁素体	一般	441 ~ 539	192 ~ 245	0.43 ~ 0.52	—	—	—	42.8 ~ 81.3
	①	490	210	0.43	145	0.30	1.4	
铁素体 + 珠光体②		621	276	0.44	166	0.27	1.7	—
珠光体	≈ 100%	728	240	0.33	172	0.25	1.4	31.0 ~ 51.7
	≈ 95%	781	250	0.32	201	0.25	1.24	
	≈ 85%	843	270	0.32	221	0.26	1.22	
回火马氏体③		931	338	0.36	207	0.22	1.6	22.7 ~ 34.2⑤
奥氏体 + 上贝氏体		879 ~ 996	316 ~ 357	0.36	—	—	—	83.9 ~ 90.4⑥
下贝氏体		1177 ~ 1471	304 ~ 343	0.23 ~ 0.26	—	—	—	53.8 ~ 61.4

- ① 美国 ASTM A536—70 牌号 65-45-12。
② 美国 ASTM A536—70 牌号 80-55-06。
③ 美国 ASTM A536—70 牌号 120-90-02。900℃油淬 + 600℃回火。
④ 断裂韧度是所对应基体的统计数据,与左侧的其他力学性能不对应。
⑤ 某厂实测:若 920℃/2h,硝盐淬火,380℃/12min 回火, K_{IC} 22.7MPa \sqrt{m} ;若 860℃/2h,硝盐淬火,380℃/12min 回火, K_{IC} 34.2MPa \sqrt{m} 。
⑥ 等温淬火:890℃/0.5h,360℃/2h。

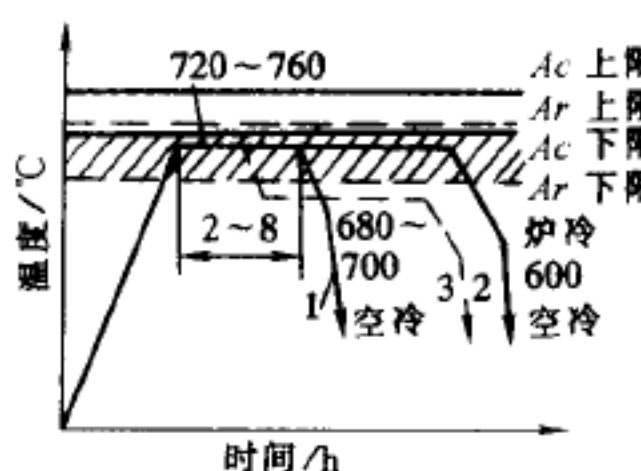
2. 球墨铸铁热处理工艺

(1) 退火(表 8-46 和表 8-47,图 8-17 和图 8-18)

表 8-46 球墨铸铁退火工艺规范

热处理类型	热处理目的	热处理规范	金相组织	备 注
去应力低温退火	消除或降低残留应力,并使其稳定化		同铸铁原始组织	球铁根据对工件的组织性能的要求,一般均经其它较复杂的热处理,故不一定要进行此项去应力退火
高温石墨化退火	消除自由渗碳体并降低硬度,改善可加工性,提高塑性和韧性		1、2—铁素体 + 石墨或铁素体 + 珠光体 + 石墨 3—珠光体 + 石墨	1、2—铁素体基体规范 3—珠光体基体规范

(续)

热处理类型	热处理目的	热处理规范	金相组织	备 注
低温石墨化退火	使共析渗铁体石墨化与粒化,从而降低硬度,改善可加工性并提高塑性和韧性		1—铁素体 + 珠光体 + 石墨 2、3—铁素体 + 石墨	1—铁素体-珠光体基体规范 2、3—铁素体基体规范

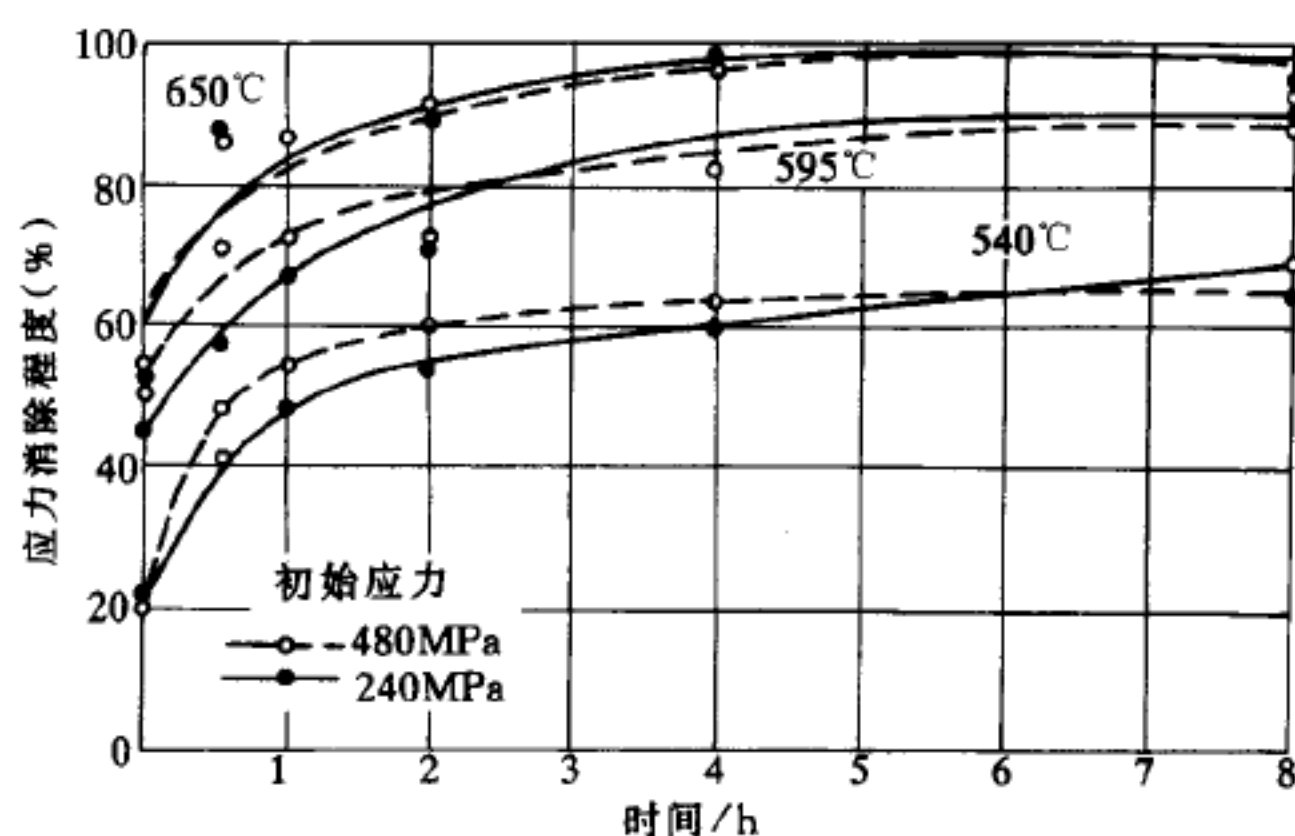


图 8-17 退火温度和时间对球墨铸铁应力消除程度的影响

(化学成分均为质量百分数: C3.52, Si2.72, Mn0.30, Ni1.27, Cu0.40, Mg0.050; 初始应力: 虚线为 480MPa, 实线为 240MPa。)

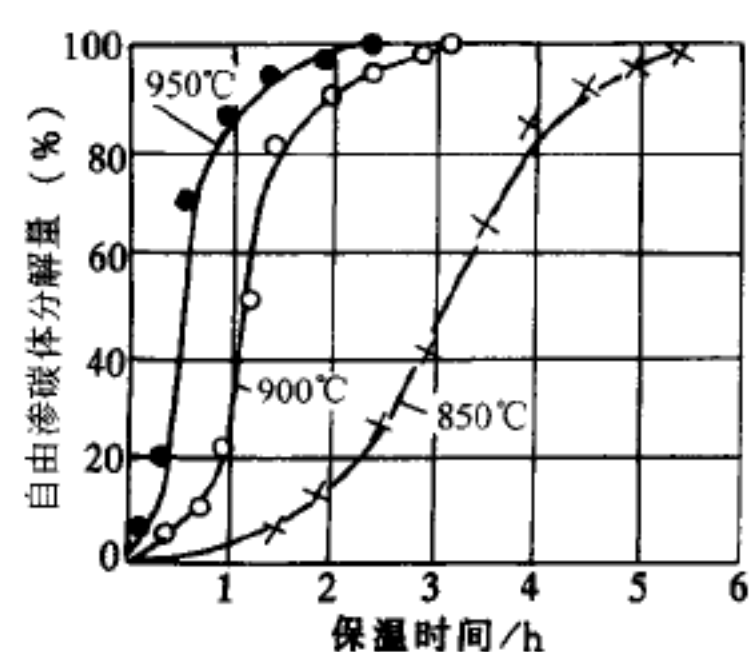
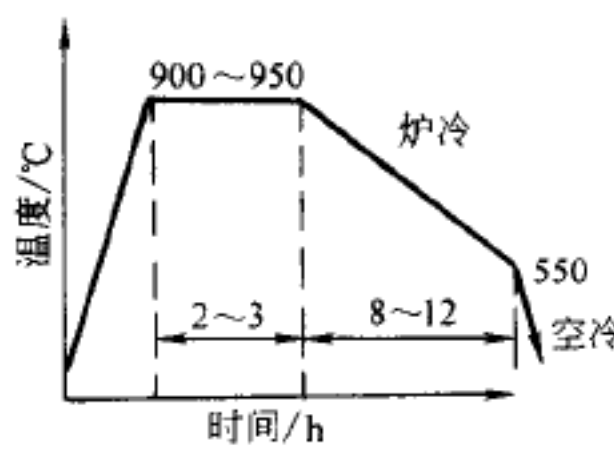
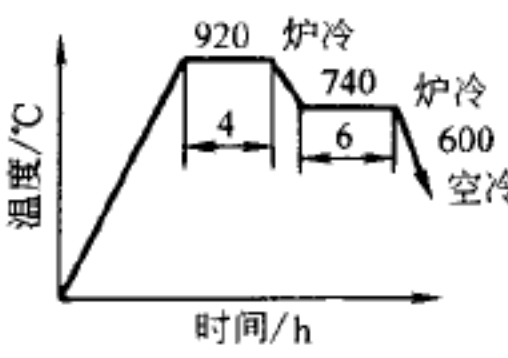
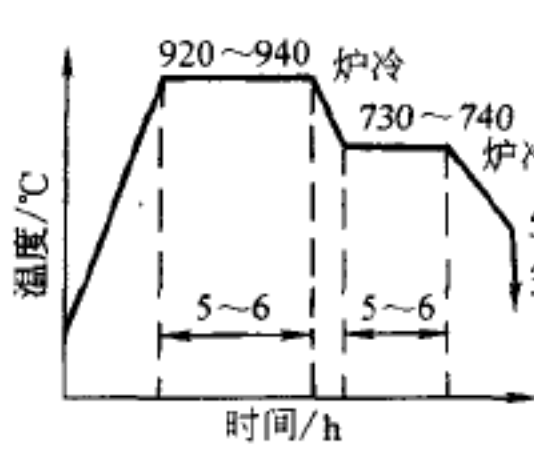
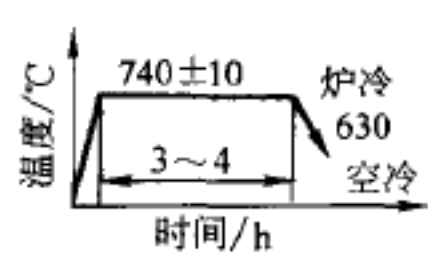


图 8-18 退火温度 and 保温时间对球墨铸铁($w_c 3.2\%$, $w_{Si} 2.5\%$, $w_{Mn} 0.7\%$)中自由渗碳体量的影响(原始组织为珠光体 + 牛眼状铁素体 + 莱氏体 + 球状石墨)

表 8-47 球墨铸铁件高温退火工艺实例

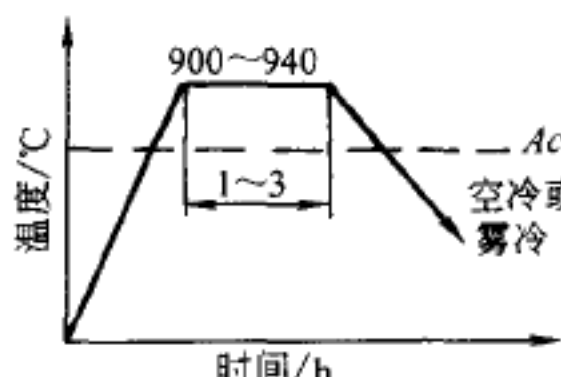
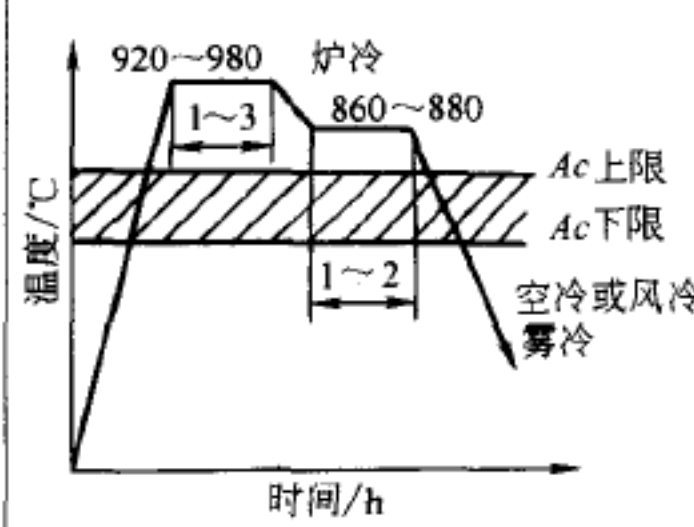
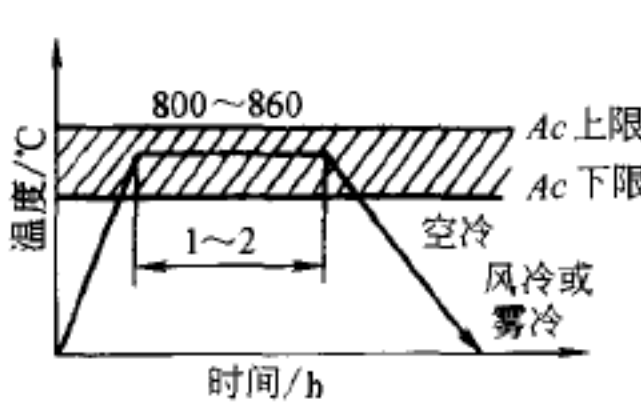
铸件名称	化学成分(质量分数)(%)	退火工艺曲线	力学性能
高压铜液泵连杆、高压缸体, 蒸汽往复泵曲轴, 十字头等	C3.4, Si2.4~3.0, Mn<0.5, S<0.03, P<0.08, Mg0.015~0.030, RE0.015~0.030		$\sigma_b \geq 400\text{MPa}$ $\delta \geq 10\%$ $a_K \geq 30\text{J/cm}^2$
中压阀门体	C3.0~3.5, Si2.5~3.0, Mn \approx 0.6, P \leq 0.1, S \leq 0.025, Mg \approx 0.04, RE \approx 0.03		$\sigma_b = 495\text{MPa}$ $\delta = 19\%$ $\psi = 20.5\%$ $a_K \geq 95\text{J/cm}^2$ (无缺口)

(续)

铸件名称	化学成分(质量分数)(%)	退火工艺曲线	力学性能
汽车离合器踏板, 中间传动轴支架, 后桥壳、壳盖	C3.8~4.1, Si2~2.4, Mn0.5~0.8, P<0.1, S<0.06, Mg0.03~0.04, RE0.03~0.04		$\sigma_b = 465\text{MPa}$ $\delta = 18\% \sim 21.7\%$ $a_K = 150\text{J/cm}^2$ 170HBW
拖拉机零件: 差速器壳、摆臂、拨叉、踏板, 轮毂、轴承座盖等	C3.2~3.6, Si2.6~2.8, Mn0.6~0.7, P≤0.1, S0.016~0.03, Mg0.035~0.038, RE0.04~0.05		$\sigma_b = 461 \sim 500\text{MPa}$ $\delta = 14\% \sim 12\%$ $a_K = 58.8 \sim 132\text{J/cm}^2$

(2) 正火(表 8-48 ~ 表 8-52, 图 8-19 和图 8-20)

表 8-48 球墨铸铁正火工艺规范

热处理类型	热处理目的	热处理规范	金相组织	备注
高温完全奥氏体化正火	提高组织均匀性, 改善可加工性, 提高强度、硬度、耐磨性或消除白口及游离渗碳体		珠光体 + 少量铁素体(牛眼状)	复杂铸件正火后需要回火
正火 阶段正火	提高组织均匀性, 改善可加工性, 提高强度、硬度、耐磨性或消除白口及游离渗碳体 阶段正火是为了消除球铁铸态组织中的过量自由渗碳体或复合磷共晶, 防止形成二次网状渗碳体		珠光体 + 少量铁素体(牛眼状)	复杂铸件正火后需要回火
中温部分奥氏体化正火	获得较高的综合力学性能, 特别是塑性和韧性		珠光体 + (碎块状或条块状)铁素体 + 球状石墨	复杂铸件正火后需要回火

(续)

热处理类型	热处理目的	热处理规范	金相组织	备注
中温部分奥氏体化正火	<p>获得较高的综合力学性能,特别是塑性和韧性</p> <p>二阶段正火在于消除铸件于铸态时存在过量的自由渗碳体或成分偏析较严重的情况,提高组织均匀性</p>		珠光体 + (碎块状或条块状) 铁素体 + 球状石墨	复杂铸件正火后需要回火
低碳奥氏体化正火(高温不保温正火)	获得较好的综合力学性能(包括强度和韧性)		珠光体 + 少量铁素体(碎块状) + 球状石墨	<p>铸态如存过量自由渗碳体时,在正火前需经高温石墨化退火</p> <p>复杂铸件正火后需要回火</p>

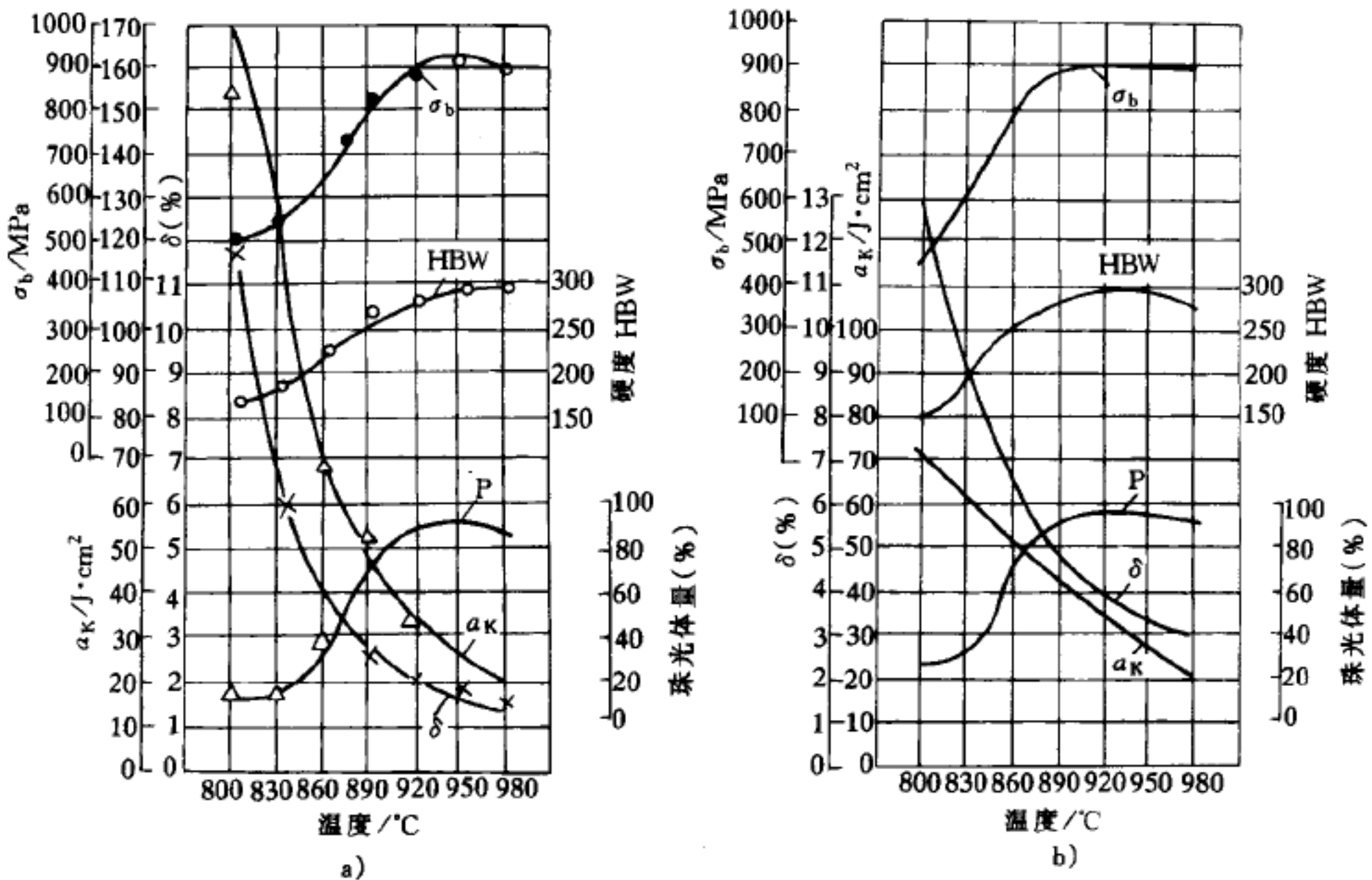


图 8-19 正火温度对球墨铸铁珠光体量和力学性能的影响(铸态试样

25mm × 25mm × (120 ~ 150)mm, 保温 30min, 风冷)

a) C0.53, Si2.92, Mn0.8, S0.013, P0.072, Mg0.04, RE0.029

b) C0.53, Si2.05, Mn0.75, S0.023, P0.059,

Mg0.047, RE0.034

(成分均为质量百分数)

表 8-49 球墨铸铁正火冷却方式与珠光体量

正火温度/℃	保温时间/h	冷却方式	珠光体量(%)
920	1	空冷	70~75
920	1	风冷	85
920	1	喷液冷	90~95
900	1.5	空冷	70~75
900	1.5	风冷	85
900	1.5	喷液冷	90~95

注:铸件成分(质量百分数):C3.7~4.2, Si2.4~2.5, Mn0.5~0.8, P<0.1, S<0.05。

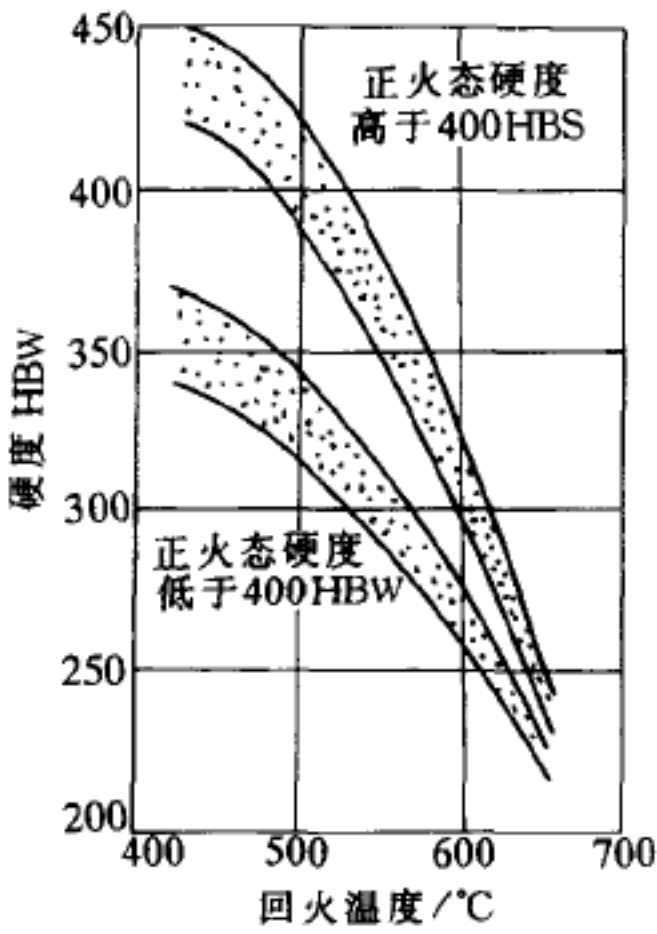


图 8-20 正火后的回火温度对球墨铸铁硬度的影响

表 8-50 球墨铸铁完全奥氏体化正火实例

铸件名称	化学成分(质量分数)(%)	工艺曲线	力学性能
NJ130 及 NJ230 汽车曲轴、凸轮轴, 变速杆叉等	C3.8~4.05, S2.0~2.3, Mn0.6~0.8, P<0.1 S0.02~0.03, RE0.02~0.035, Mg0.025~0.045		σ_b 850~950MPa δ 2%~4% a_K 25~50J/cm ² 255~285HBW
汽车曲轴	C3.6~3.7, Si2.4~2.8, Mn0.7~0.9		σ_b 800~900MPa δ >2.0% a_K 12~15J/cm ² 240~270HBW
压缩机大型曲轴	C3.1~3.6 Si2.6~2.9, Mn0.6~0.8		σ_b 650~800MPa δ 4%~8% a_K 15~50J/cm ² 220~255HBW

表 8-51 球墨铸铁部分奥氏体化正火实例

铸件名称	化学成分(质量分数)(%)	工艺曲线	力学性能
190, 195 柴油机曲轴	C3.0~3.2, Si2.8~3.1, Mn0.6~0.8, P0.06~0.07, S0.02~0.03		σ_b 770~930MPa δ 3.8%~8.2% a_K 25~26J/cm ² 229~277HBW

(续)

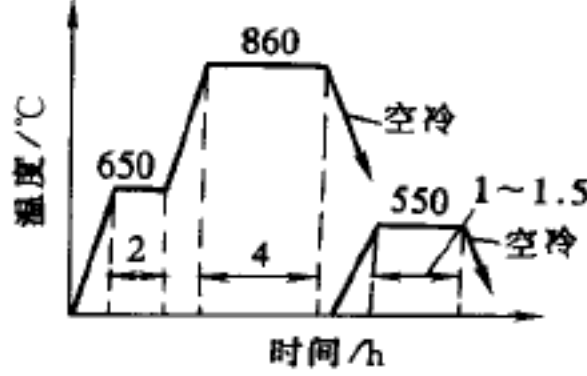
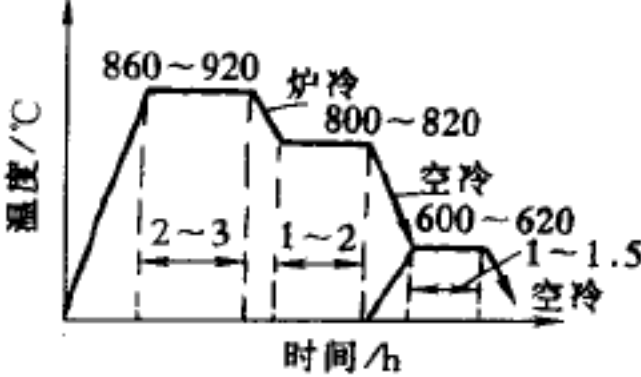
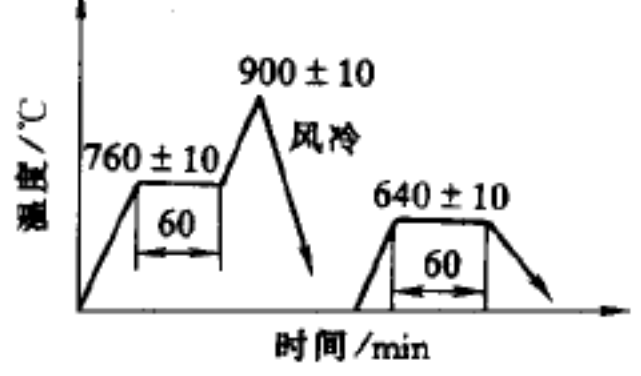
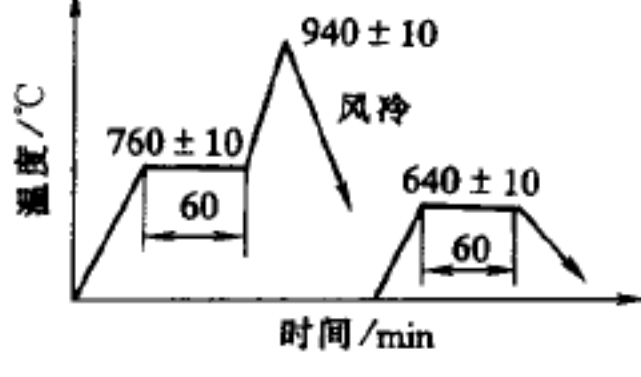
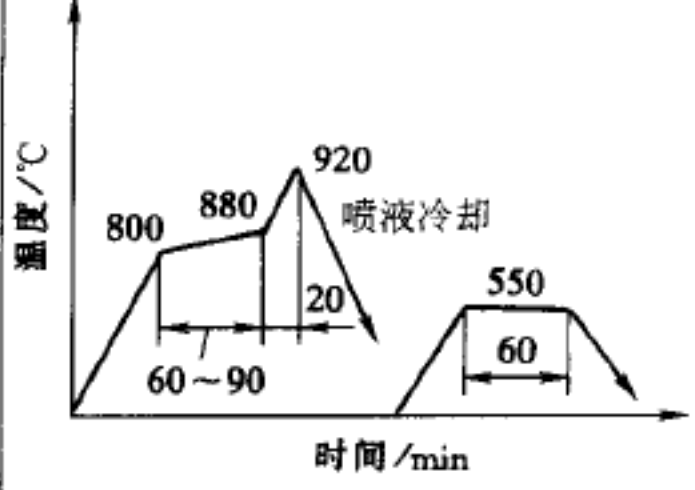
铸件名称	化学成分(质量分数)(%)	工艺曲线	力学性能
大型船用空心曲轴	C3.8~3.9, Si2.2~2.4, Mn0.6~0.8		σ_b 780~850MPa $\delta 2\%$ ~ 2.5% a_K 20~30J/cm ²
曲轴、连杆、齿轮等	C3.7~3.9, Si2.2~2.4, Mn0.6~0.8, P<0.1, S<0.04		σ_b 700~840MPa $\delta 2\%$ ~ 5% a_K 16~22J/cm ² 215~254HBW

表 8-52 球墨铸铁低碳奥氏体化正火实例

铸件名称	化学成分(质量分数)(%)	正火工艺	力学性能	基体组织
曲轴、齿轮	C3.8, Si2.2, Mn0.6, S0.026, P<0.1, Mg0.05, RE0.025		σ_b 720~730MPa $\delta 6.4\%$ ~ 7.2% a_K > 50J/cm ² 247HBW	粒状珠光体 + 少量点状铁素体
曲轴、齿轮	C3.8, Si2.2, Mn0.6, S0.026, P<0.1, Mg0.05, RE0.025		σ_b 810~866MPa $\delta 2.6\%$ ~ 6.4% a_K 25~33J/cm ² 220~260HBW	粒状珠光体 + 少量点状铁素体
曲轴	C3.7~3.9, Si2.2~2.4, Mn0.6~0.8, S<0.04, P<0.06, Mg<0.06, RE0.03~0.04		σ_b 850~875MPa $\delta 6\%$ ~ 8% a_K 40~60J/cm ² 250~257HBW	珠光体 + 少量点状铁素体

(3) 淬火、回火(表 8-53 ~ 表 8-56, 图 8-21 ~ 图 8-29)

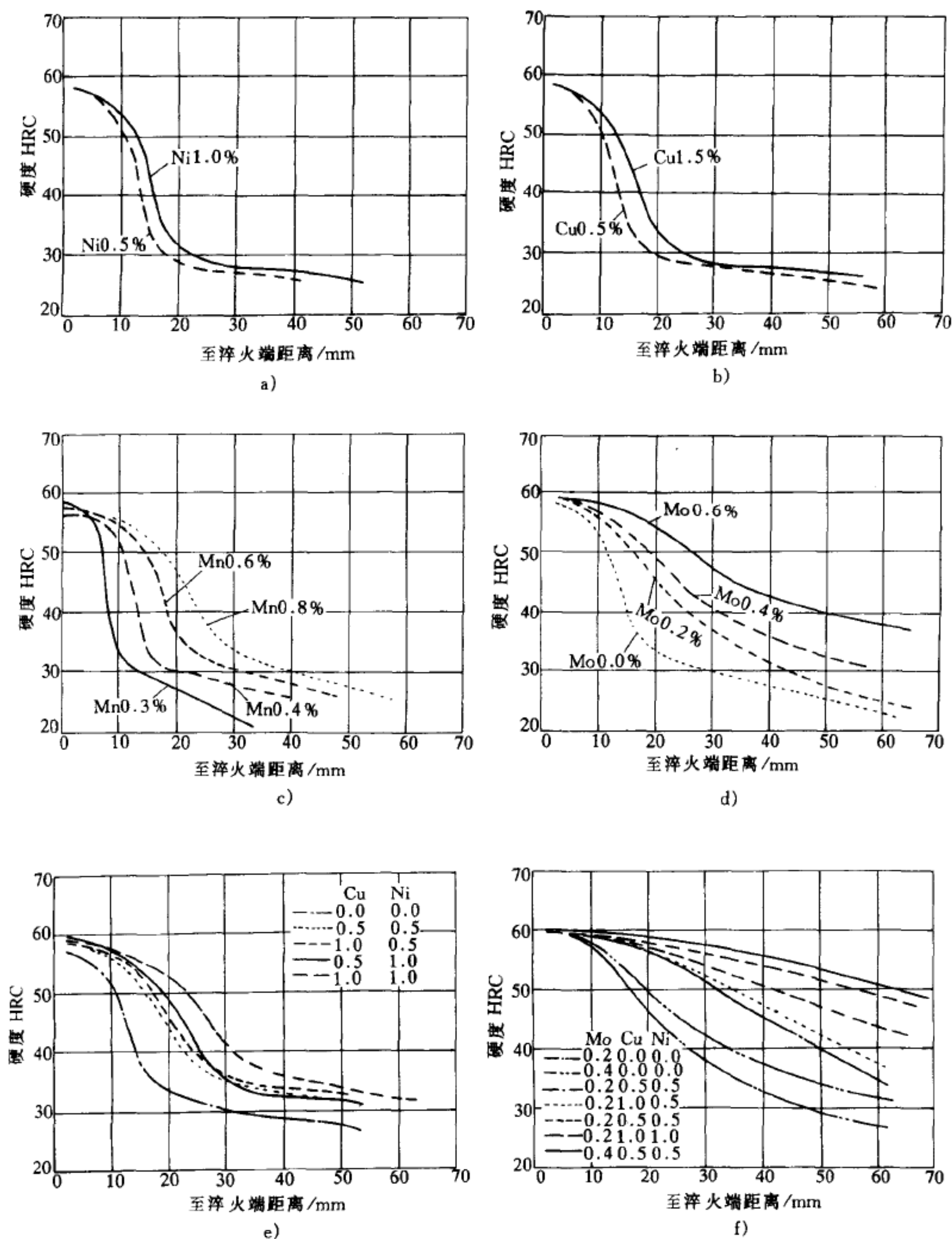


图 8-21 铜、镍、钼、锰对球墨铸铁淬透性的影响
(成分均为质量百分数)

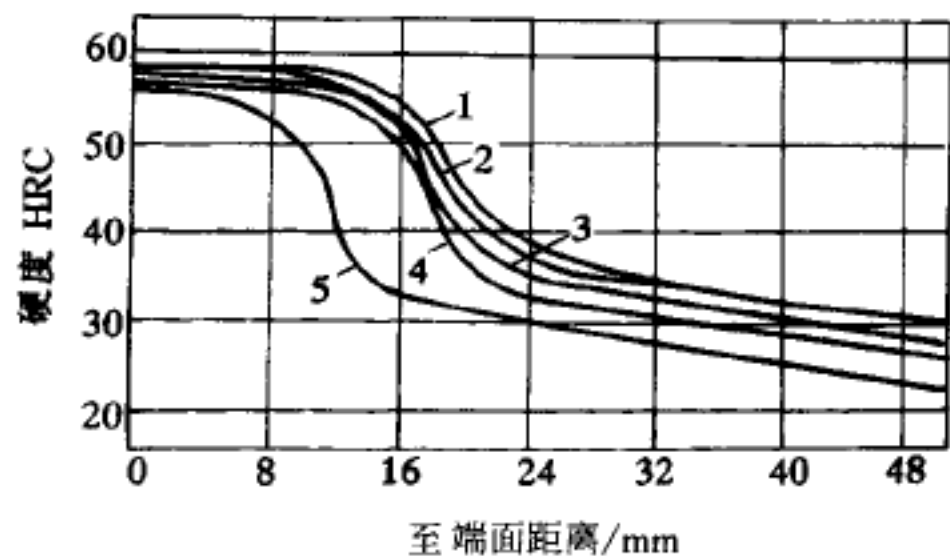


图 8-22 球墨铸铁总碳含量与淬透性的关系
(成分均指质量分数: Si3.16%, Mn0.42%, P0.036%)
1—总碳量 2.26% 2—2.45% 3—3.00%
4—3.55% 5—4.00%

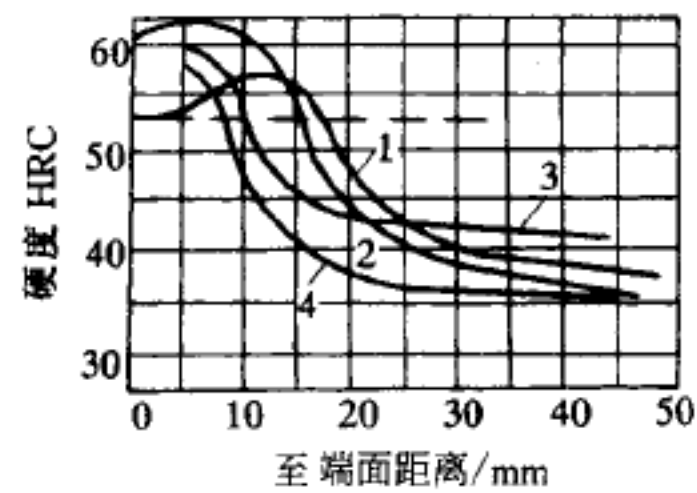


图 8-23 硅对球墨铸铁淬透性的影响(成分均为质量分数)
1—Si2.13% 2—Si2.68%
3—Si3.30% 4—Si4.03%

表 8-53 球墨铸铁淬火工艺规范

热处理类型	热处理目的	热处理规范	金相组织	备 注
淬火和回火	提高强度、硬度、耐磨性		回火索氏体 + 少量铁素体及球状石墨 回火托氏体 + 少量残留奥氏体及球状石墨 回火马氏体 + 少量残留奥氏体及球状石墨	淬火以前最好先经正火。当铸件中存在过量自由渗碳体时，在淬火前必须进行高温石墨化退火，以免析出二次网状渗碳体，这种处理方式叫“二阶段淬火”。考虑到回火脆性，应尽量避免 250~300℃ 范围内回火。
表面淬火	提高表面层硬度、耐磨性和疲劳强度		表面层为细针状马氏体 + 少量残留奥氏体及球状石墨，过渡层为小岛状马氏体 + 细小铁素体，内部与原始组织相同。	对铁素体基体的球铁，必须先进行正火，使珠光体量 ≥ 70%。有时为了消除淬火应力而在 380~410℃ 温度范围内回火处理。
等温淬火	全奥氏体化等温淬火 提高强度、硬度、韧性和耐磨性，减少淬火变形及裂纹。它是发挥球铁材料最大潜力的热处理方法		下贝氏体 + 少量马氏体 + 少量残留奥氏体 + 球状石墨	铸态组织需无游离渗碳体，如果存在过量的自由渗碳体，则在淬火前需经高温石墨化退火。等温淬火后再经适当温度回火，可进一步提高性能。

(续)

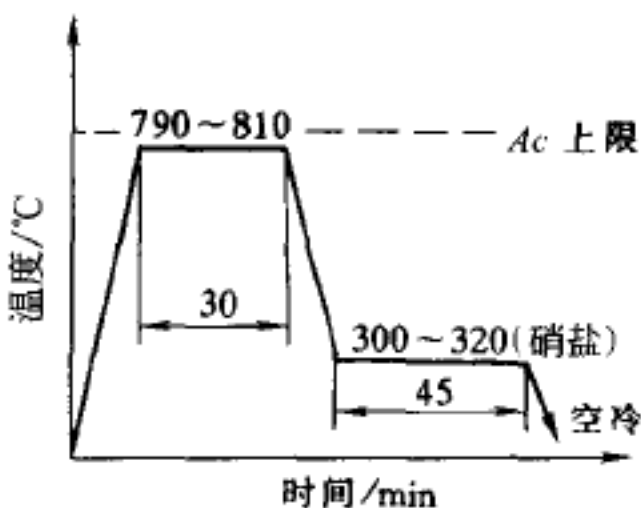
热处理类型	热处理目的	热处理规范	金相组织	备 注
等温淬火	部分奥氏体化等温淬火 获得良好的强度和韧性		下贝氏体 + 碎片状铁素体	铸态组织需无游离渗碳体,如果存在过量的自由渗碳体,则在淬火前需经高温石墨化退火。等温淬火后再经适当温度回火,可进一步提高性能

表 8-54 淬火加热温度与含铜球墨铸铁的组织及性能^①

加热温度 /℃	力 学 性 能			金相组织
	σ_b /MPa	a_K /J·cm ⁻²	HRC	
820	—	15.3	49 ~ 53	针状马氏体 + 破碎铁素体 + 石墨
850	617	11.6	53 ~ 57	针状马氏体 + 残留奥氏体 + 石墨
890	707	8.1	56 ~ 58	针状马氏体 + 残留奥氏体 + 石墨
920	652	6.8	53 ~ 60	粗针状马氏体 + 残留奥氏体 + 石墨
950	—	6.3	53 ~ 59	粗针状马氏体 + 残留奥氏体 + 石墨

① 成分均为质量百分数:Si2.33,Mn1.14,Cu1.08,淬火后 160℃回火。

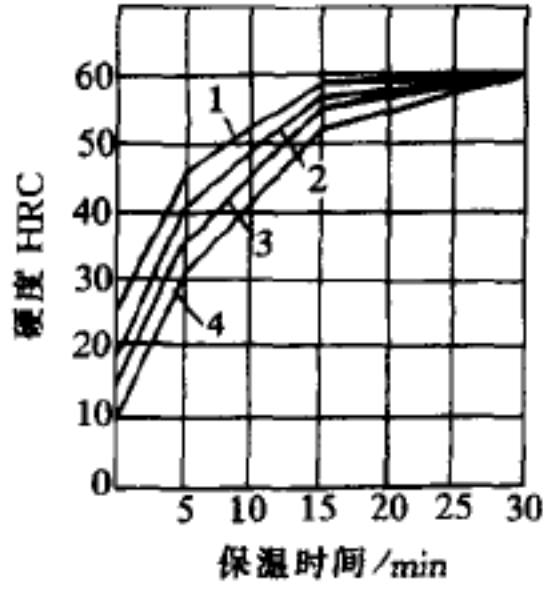


图 8-24 原始组织和淬火保温时间对球墨铸铁硬度的影响
(成分为质量百分数:C3.74, Si2.63, Mn0.30, P0.020, S0.009)
1—铁素体≈15% 2—铁素体≈30%
3—铁素体≈65% 4—铁素体 100%

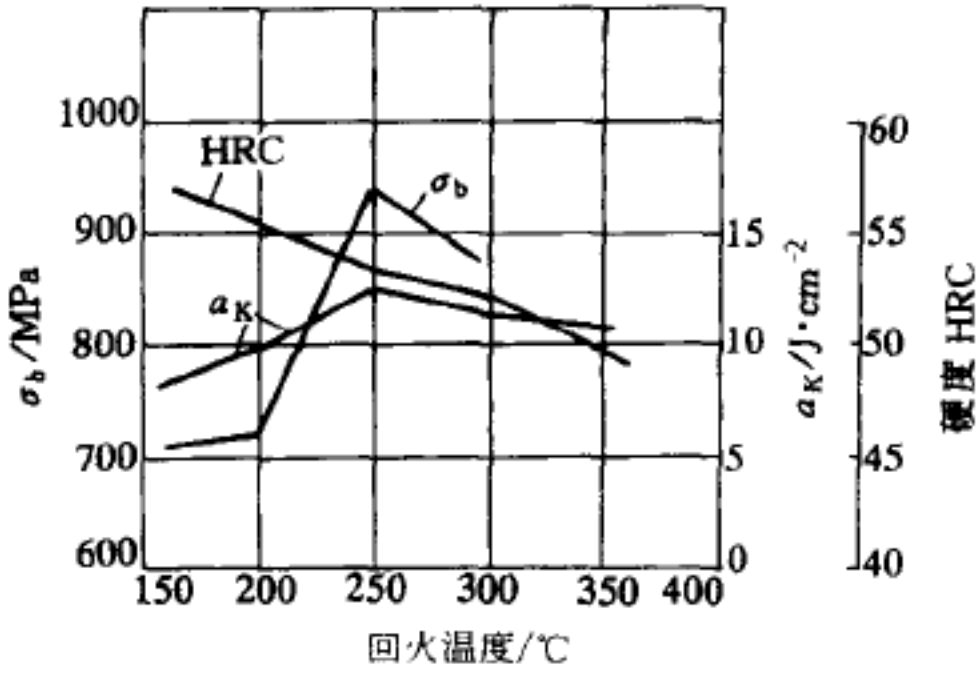
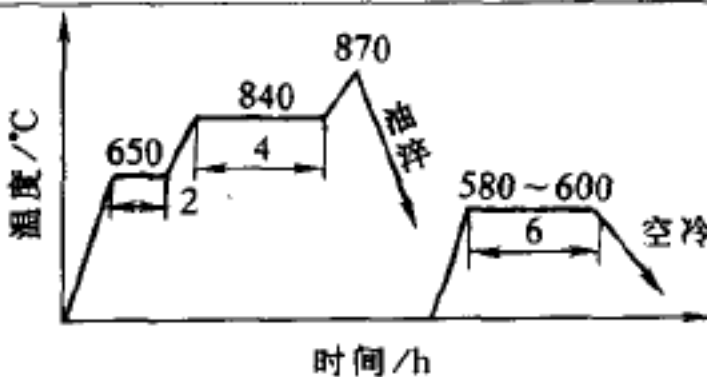
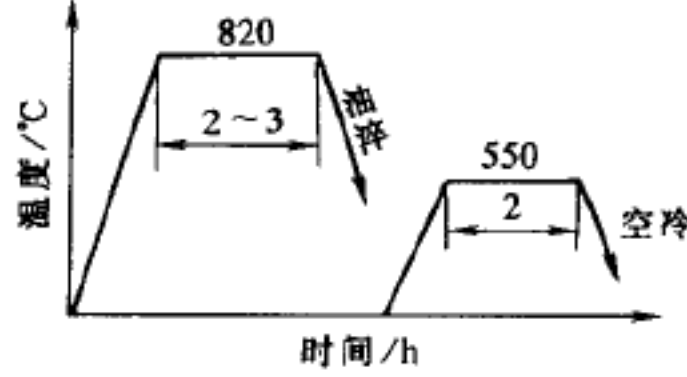
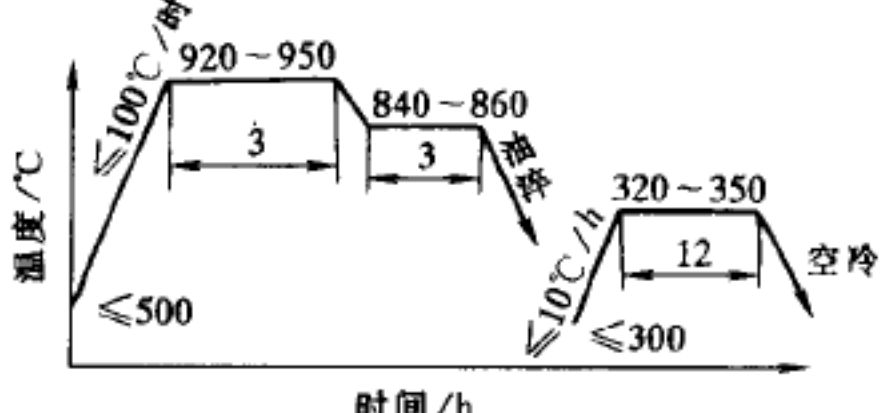


图 8-25 含铜球墨铸铁的回火温度—力学性能曲线
(成分均指质量百分数:C3.42, Si2.33, Mn0.016, P0.07, Cu1.08, Mg0.013, RE0.017)

表 8-55 球墨铸铁淬火回火实例

铸件名称	化学成分(质量分数)(%)	工艺曲线	力学性能	备注
大型船用柴油机曲轴	C3.8 ~ 3.9, Si2.2 ~ 2.4, Mn0.6 ~ 0.8, Cu0.4, Mo0.2, Mg0.04 ~ 0.06, RE0.02 ~ 0.04		本体取样 σ_b 850 ~ 950MPa δ 1.5% ~ 2.0% a_K 20 ~ 30J/cm ²	短时升温至 870℃以防淬火转移时降温

(续)

铸件名称	化学成分(质量分数)(%)	工艺曲线	力学性能	备注
6250 柴油机连杆	C3.4 ~ 3.8, Si2.4 ~ 2.8, Mo0.5 ~ 0.7, S0.03, P0.06, Mg0.04 ~ 0.06, RE0.015 ~ 0.030		本体取样 σ_b 710 ~ 800MPa δ 3% ~ 5% a_K 30 ~ 50J/cm ² 215 ~ 269HBW	属不完全淬火
卷管机胎管	C3.67, Si2.70, Mn0.83, P0.065, S0.025, Mo0.40, Mg0.035, RE0.03		试样 σ_b 1230MPa a_K 11J/cm ² 415HBW	铸件形状复杂重 6.5t

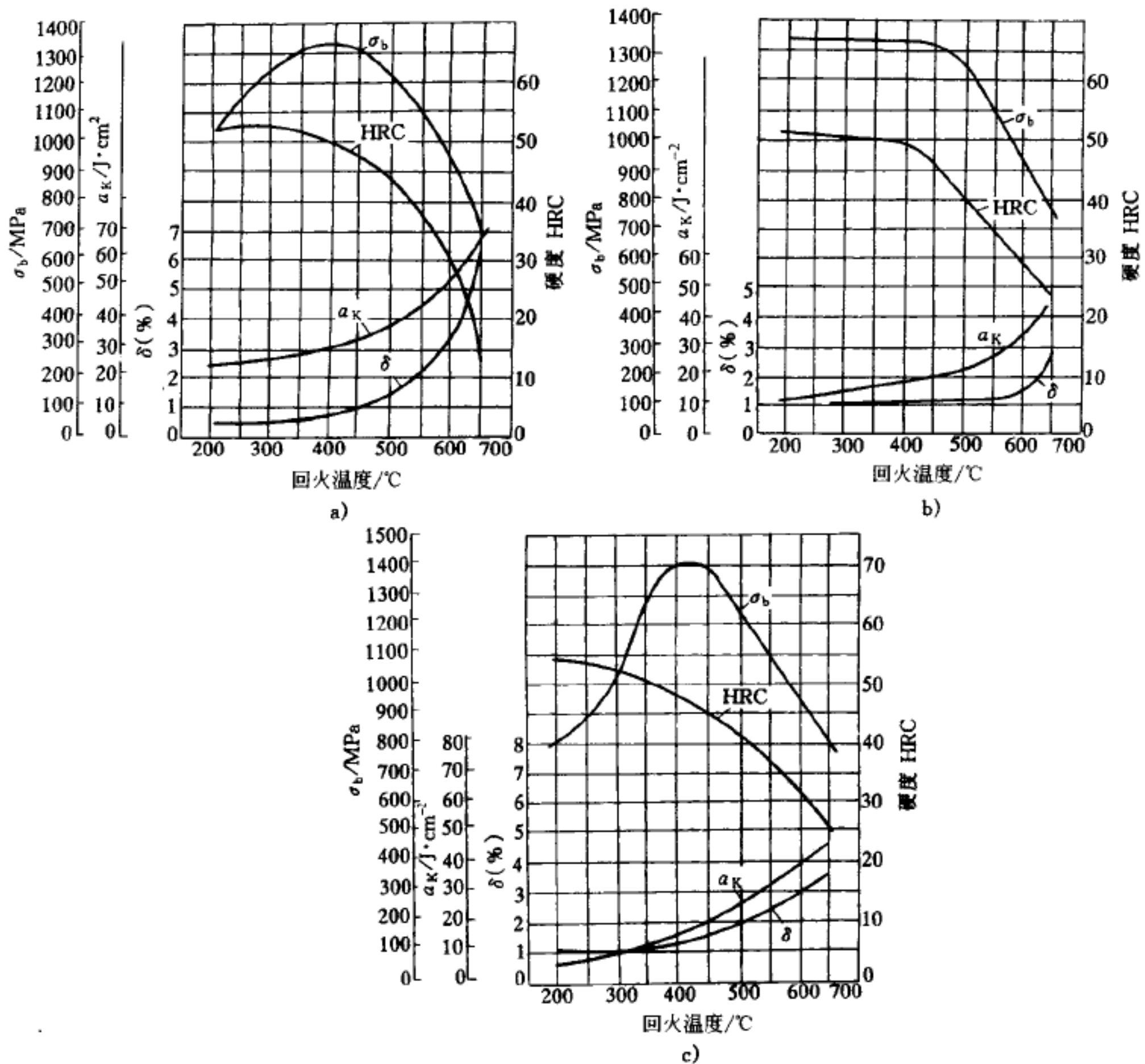


图 8-26 三种球墨铸铁在油中淬火并在不同温度回火后的力学性能

a) C3.46, Si3.37, Mn0.62, S0.009, P0.069, Mg0.056, RE0.045, 940℃油淬 b) C3.53, Si2.92, Mn0.80, S0.013, P0.072, Mg0.04, RE0.045, 900℃油淬 c) C3.53, Si2.05, Mn0.75, S0.023, P0.059, Mg0.047, RE0.034, 880℃油淬 注:成分均指质量百分数

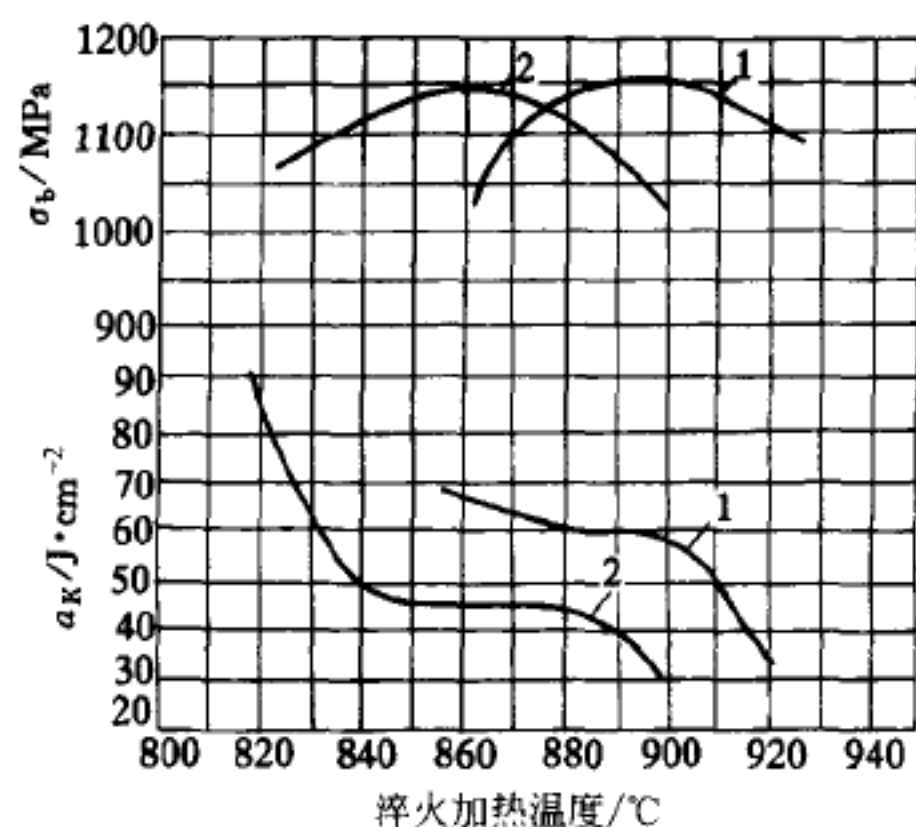


图 8-27 不同加热温度对球墨铸铁等温淬火(270°C)后的力学性能的影响
 1—化学成分(质量分数,%) 3.53, Si2.92, Mn0.80, S 0.013, P 0.072, Mg 0.040, RE0.029
 2—化学成分(质量分数,%) 3.53, Si2.05, Mn0.75, S 0.023, P 0.079, Mg 0.041, RE0.034
 注:成分均指质量百分数

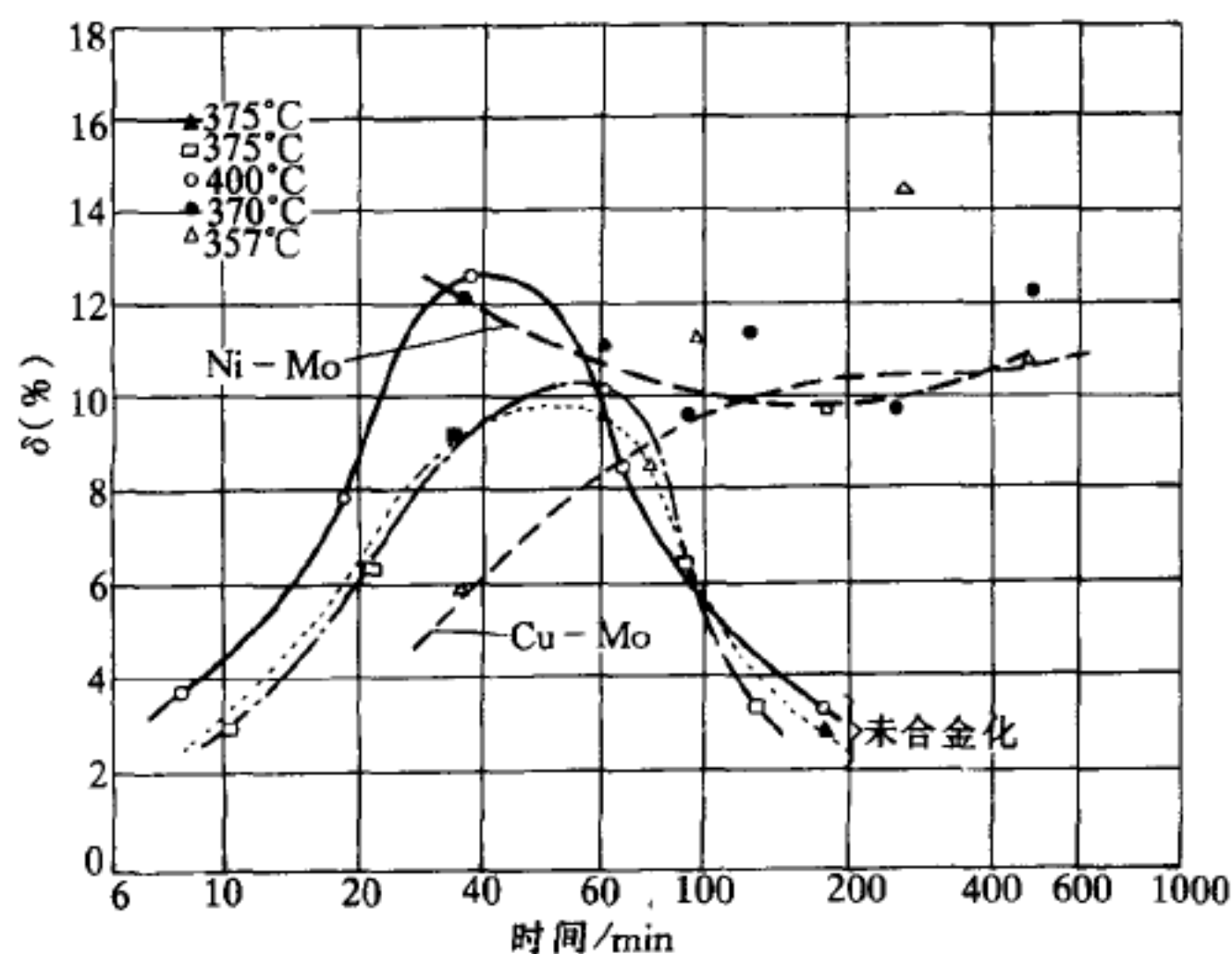


图 8-28 等温时间对球墨铸铁等温淬火后伸长率的影响

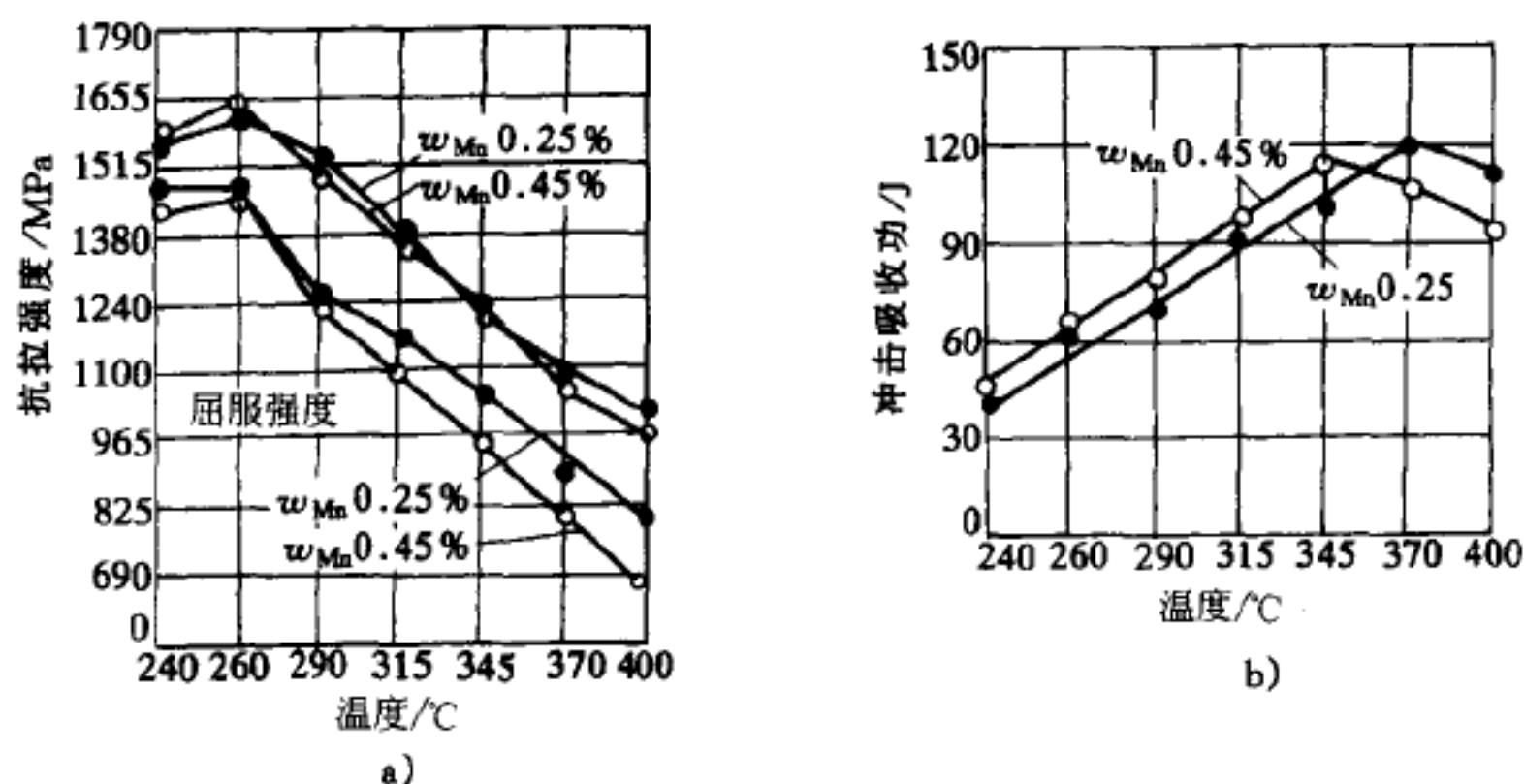


图 8-29 等温温度对球墨铸铁等温淬火后力学性能的影响

表 8-56 球墨铸铁等温淬火实例

铸件名称	化学成分(质量分数)(%)	工艺曲线	力学性能
拖拉机减速齿轮	C3.3 ~ 3.6, Si2.8 ~ 3.1, Mn0.3 ~ 0.5, P < 0.06, S < 0.03, Mo ~ 0.15, Mg0.035 ~ 0.060, RE0.03 ~ 0.05		σ_b 1270 ~ 1500MPa δ 1% ~ 2% a_K 60J/cm ² 43 ~ 45HRC
拖拉机链轨板	C3.6 ~ 3.8, Si2.8 ~ 3.2, Mn < 0.5, P < 0.1, S < 0.03, Mg0.035 ~ 0.07, RE0.035 ~ 0.07		a_K 30J/cm ² 38 ~ 44HRC
柴油机凸轮轴	C3.7 ~ 4.2, Si2.4 ~ 2.6, Mn0.5 ~ 0.8, P < 0.1, S ≤ 0.02, Mg > 0.04, RE0.02 ~ 0.04		σ_b 1050 ~ 1200MPa $\sigma_{0.2}$ 950 ~ 1000MPa a_K 41 ~ 42J/cm ² δ 1.2% 39 ~ 46HRC
对置二冲程曲轴	C3.65 ~ 3.85, Si2.9 ~ 3.1, Mn0.4 ~ 0.6, P < 0.1, S0.02 ~ 0.03, Cu0.4 ~ 0.6, Mo0.2 ~ 0.4		σ_b 1330MPa $\sigma_{0.2}$ 11.0MPa δ 3.8% a_K 70.1J/cm ² 415HBW

8.5 铸铁件热处理质量检验、缺陷分析与防止

1. 铸铁件热处理质量检验

(1) 检验项目与要求(表 8-57 ~ 表 8-63)

表 8-57 铸铁件退火、正火处理质量检验项目与要求

热处理 工序	热处理后 检验项目	项目的质量要求						
退 火 、 正 火 处 理	1. 外观	铸件表面不能有有害裂纹及伤痕等缺陷						
	2. 表面硬度	1. 铸件表面硬度测定位置应根据工艺文件的规定执行 2. 铸件表面硬度的误差范围不能超过下表中的规定						
		工艺类型	表面硬度误差范围					
			单 件			同一批件		
			HBW	HV	HRB	HBW	HV	HRB
		正火	35	35	6	70	70	12
		完全退火	35	35	6	70	70	12
		不完全退火	35	35	6	70	70	12
	3. 金相组织	等温退火	30	30	5	60	60	10
		球化退火	25	25	4	50	50	8
	4. 变形	根据正火与退火工艺类型及铸件材质种类的不同,应得到满足各自要求的正常组织: 灰铸铁件石墨化退火组织是使白口部分的渗碳体分解达到石墨化 球墨铸铁件退火后组织应以铁素体为主 球墨铸铁件正火后的组织为珠光体或索氏体						
		铸件的变形应不影响其以后的机械加工和使用 铸件弯曲的允许值不应超过下表中的规定:						
		工艺类型	每米允许弯曲的最大值 ^③ /mm					
			1 类 ^①			2 类 ^②		
		正火	0.5			5		
		完全退火	0.5			5		
		不完全退火	0.5			5		
		等温退火	0.5			5		
	5. 其他	球化退火	0.2			3		
		去应力退火	0.3			4		

① 1类——铸件原样使用,或者只进行磨削或部分磨削加工。

② 2类——难以矫正的或随后进行切削或部分切削加工的铸件。

③ 表中允许弯曲的最大值系指铸件经矫正后的值。

表 8-58 铸铁件淬火回火处理质量检验项目与要求

热处理 工序	热处理后 检验项目	项目的质量要求						
淬 火 回 火 处 理	1. 外观	在铸件表面不能有有害的裂纹及伤痕等缺陷						
	2. 表面硬度	1. 铸件表面硬度测定位置应根据工艺文件的规定执行。对于局部淬火回火件,应避免在淬火区与未淬火区的交界部分测定硬度 2. 铸件表面硬度的误差范围,根据不同类型的淬火回火件,不能超过下表中规定:						
		淬火回火 铸件的类型	表面硬度误差范围 HBW					
			单 件			同一批件		
			< 35	35 ~ 50	> 50	< 35	35 ~ 50	> 50
		特殊重要件	3	3	3	5	5	5
		一般件	6	5	5	9	7	7
		淬火回火 铸件的类型	表面硬度误差范围 HBW					
			单 件			同一批件		
			< 330	330 ~ 450		< 330	330 ~ 450	
		特殊重要件	20	25		30	45	
		重要件	30	35		45	65	
		一般件	40	50		60	80	
		淬火回火 铸件的类型	表面硬度误差范围 HV					
			单 件			同一批件		
			< 350	350 ~ 500	> 500	< 350	350 ~ 500	> 500
		特殊重要件	25	35	60	40	55	100
		重要件	30	45	80	50	80	120
		一般件	45	70	120	70	90	150
		对大型铸件,其表面硬度误差可按照图样规定执行 单件表面硬度误差是指随机抽检单件时硬度值的不均匀度;同一批件表面硬度误差是指用同一批材料在同一淬火回火条件下的铸件表面硬度值的偏差范围						
		3. 金相组织	根据淬火回火工艺类型及铸件材质的不同,应得到满足各自要求的正常组织: 球墨铸铁件淬火低温回火后的组织为细针状回火马氏体和残留奥氏体;淬火中温回火后的组织为回火托氏体和残留奥氏体;淬火高温回火后的组织为回火索氏体和残留奥氏体					
	4. 变形	铸件淬火回火的畸变应不影响其以后的机械加工和使用 铸件弯曲的允许值不应超过下表中的规定:						
		类 型			每米允许弯曲的最大值/mm ^③			
		1 类 ^①			0.5			
		2 类 ^②			5			
		3 类 ^①			不要求			

① 1类——成品原样使用,或者只进行研磨或进行部分磨削。

② 2类——毛坯进行切削加工或部分切削加工。

③ 3类——除1类和2类以外的铸件。

④ 表中允许弯曲的最大值系指淬火回火铸件经矫正后的值。

表 8-59 铸铁件火焰淬火回火处理质量检验项目与要求

热处理 工序	热处理后 检验项目	项目的质量要求				
火焰 淬火 回火 处理	1. 外观	铸件表面不应有过烧、熔化、裂纹等缺陷				
	2. 表面硬度	铸件表面硬度的误差范围应符合下表中的规定：				
		铸件的类型	表面硬度误差范围 HRC			
			单 件		同一批件	
			≤ 50	> 50	≤ 50	> 50
		重要件	5	4	6	5
		一般件	6	5	7	6
		铸件的类型	表面硬度误差范围 HV			
			单 件		同一批件	
			≤ 500	> 500	≤ 500	> 500
		重要件	55	85	75	105
		一般件	75	105	95	125
		铸件的类型	表面硬度误差范围 HS			
			单 件		同一批件	
			≤ 80	> 80	≤ 80	> 80
		重要件	6	8	8	10
		一般件	8	10	10	12
	3. 有效硬化层深度	铸件有效硬化层的波动范围不许超过下表中的规定：				
		铸件有效硬化层深度 /mm	深度波动范围/mm			
			单 件	同一批件		
		≤ 1.5	0.2	0.4		
		> 1.5 ~ 2.5	0.4	0.6		
		> 2.5 ~ 3.5	0.6	0.8		
		> 3.5 ~ 5.0	0.8	1.0		
		> 5.0	1.0	1.5		
	4. 硬化区范围	1. 硬化区范围按图样或有关技术文件规定的表面硬化区而定,必须规定合理的允许偏差 2. 整体表面淬火的板件,其非淬硬边缘和轴件的非淬硬端部不大于 10mm 3. 大型铸件允许留软带,其宽度不大于 10mm,软带间距应大于 100mm				
	5. 金相组织	淬火部位的金相组织根据铸件的材料和性能要求应为正常的淬火组织或淬火回火组织				
	6. 畸变	处理后铸件的畸变量应不影响以后的机械加工质量和使用性能。具体铸件允许的畸变量由有关双方协商确定				

表 8-60 铸铁件感应加热淬火回火处理质量检验项目与要求

热处理 工序	热处理后 检验项目	项目的质量要求				
感应 淬 火 回 火 处 理	1. 外观	铸件表面不应有裂纹、锈蚀和影响使用的伤痕等缺陷				
	2. 表面硬度	1. 铸件表层淬火的表面硬度波动范围,应根据要求相应符合下表中的规定:				
		铸件的类型	表面硬度波动范围 ^② HRC			
			单 件		同一批件 ^①	
			≤ 50	> 50	≤ 50	> 50
		重要件	5	4	6	5
		一般件	6	5	7	6
		铸件的类型	表面硬度波动范围 HV			
			单 件		同一批件 ^①	
			≤ 500	> 500	≤ 500	> 500
		重要件	55	85	75	105
		一般件	75	105	95	125
		铸件的类型 (仅适用于某些大型铸件)	表面硬度波动范围 HS			
			单 件		同一批件	
			≤ 80	> 80	≤ 80	> 80
		重要件	6	8	8	10
		一般件	8	10	10	12
	3. 有效硬化层深度	2. 铸件穿透淬火的表面硬度波动范围可参照 JB/T 3877				
		1. 简单形状铸件的有效硬化层深度波动范围应符合下表的规定:				
		有效硬化层深度/mm	深度波动范围 ^{②③} /mm			
			单 件	同一批件 ^①		
		≤ 1.5	0.2	0.4		
> 1.5 ~ 2.5		0.4	0.6			
> 2.5 ~ 3.5		0.6	0.8			
> 3.5 ~ 5		0.8	1.0			
> 5	1.0	1.5				
2. 复杂形状和大型铸件的有效硬化层深度,经有关方面商定,允许有效大的波动范围						
4. 硬化区范围	硬化区范围为图样或有关文件规定的表面硬化区,应有合理的允许偏差					
5. 金相组织	处理部位的金相组织应为铸件要求的正常组织					
6. 畸变	铸件处理后的畸变量应不影响以后的机械加工质量和使用性能,具体铸件允许的畸变量由有关方面商定					

① 同一批件系指 8h 内处理的尺寸、材质及工艺相同的铸件,当同一铸件的不同部位要求的硬化层深度各异时,深度波动是指要求硬化层深同部位的波动。

② 硬化层深度测定的位置应按检验规范的规定执行,硬化区边缘不应为测定部位。

③ 除非特别说明,图样上硬化层深度为有效硬化层深度。

表 8-61 铸铁件渗碳与碳氮共渗淬火回火处理质量检验项目与要求

热处理 工序	热处理后 检验项目	项目的质量要求		
渗 碳 与 碳 氮 共 渗 淬 火 回 火 处 理	1. 外观	铸件不得有裂纹及碰伤,表面不得有锈蚀		
	2. 表面硬度	铸件表面硬度的偏差范围不得超过下表中的规定:		
		渗碳铸件 种类	表面硬度偏差范围 HRC	
			单 件	同一批件
		重要件	3	5
		一般件	4	7
	3. 硬化层深度	铸件有效硬化层深度偏差不得超过下表中的规定:		
		有效硬化层深度/mm	深度偏差范围/mm	
			单 件	同一批件
		≤0.5	0.1	0.2
		>0.5~1.5	0.2	0.3
		>1.5~2.5	0.3	0.4
		>2.5	0.5	0.6
	4. 金相组织	根据铸件的要求,达到各自的正常组织		
	5. 畸变	铸件的畸变应符合技术要求		

注:1. 局部渗碳或碳氮共渗的铸件,硬度测量位置不应在渗层边界附近。

2. 重要件是指对机械的重要性能有影响,因而对质量要求特高的铸件,除此均属一般件。

表 8-62 铸铁件气体渗氮处理质量检验项目与要求

热处理 工序	热处理后 检验项目	项目的质量要求	
气 体 渗 氮 处 理	1. 外观	1. 铸件表面不应有裂纹、剥落等缺陷 2. 铸件表面或经磨削加工后的表面不允许有肉眼可见的疏松	
	2. 渗氮层硬度和深度	1. 铸件渗氮处理后应达到工艺要求的硬度 2. 渗氮层硬度偏差值不许超过下表中的规定:	
		允许硬度偏差值 HV	
		单 件	同一批件 ^①
		80	140
		3. 渗氮层深度应达到工艺规定要求	
	3. 表面脆性	表面脆性应符合 JB 2849 标准的要求	
	4. 畸变	1. 铸件渗氮后的畸变量应符合工艺规定 2. 渗氮铸件应尽量避免校直,在不影响铸件质量和技术要求及工艺许可时,可进行冷压校或热校直 3. 冷、热校直后的渗氮铸件都应进行消除应力退火处理和探伤	
	5. 局部防渗效果检验	铸件防渗部位不应使机械加工发生困难,且不应形成对性能有害的影响	

① 同一批件系指相同铸件材料牌号,经相同预备热处理,并在同一炉次渗氮处理后的全部铸件。

表 8-63 铸铁件气体氮碳共渗处理质量检验项目与要求

热处理 工序	热处理后 检验项目	项目的质量要求			
气 体 氮 碳 共 渗 处 理	1. 外观	铸件的色泽要均匀,不允许有裂纹、剥落及伤痕等缺陷			
	2. 表面硬度及渗层深度	1. 处理后的不同材料铸件的表面硬度和渗层深度应符合下表中的规定:			
		铸件材料类别	表面硬度 HV0.1 (不小于)	渗层深度/mm	
				化合物层	扩散层(不小于)
		碳素结构钢	480	0.008 ~ 0.025	0.20
		合金结 构钢	不含铝	550	0.008 ~ 0.025
			含铝	800	0.006 ~ 0.020
		合金工具钢	700	0.003 ~ 0.015	0.10
		球墨铸铁及合金铸铁	550	0.005 ~ 0.020	0.10
		灰铸铁	500	0.005 ~ 0.020	0.10
		2. 渗层深度:氮碳共渗层由化合物层及扩散层组成,化合物层疏松按 JB 2849 标准进行评级			
	3. 畸变	铸件处理后的畸变量应符合图样或有关技术文件要求			

注:有特殊要求的铸件,如抗蚀件、薄件(厚度小于 1mm)、不锈钢或耐热钢、高速钢铸件等,可按其各自的技术要求,不受本表的限制。

(2) 金相组织检验(表 8-64 ~ 表 8-70)

表 8-64 灰铸铁金相组织检验方法与规程

检验内容	石墨分布形状、石墨长度、基体组织特征、珠光体片间距、珠光体数量、碳化物分布形状、碳化物数量、磷共晶类型、磷共晶分布形状、磷共晶数量、共晶团数量
检验方法	<p>采用金相显微镜</p> <p>1. 石墨分布形状分为 6 种:A 片状、B 菊花状、C 块片状、D 枝晶点状、E 枝晶片状、F 星状</p> <p>2. 石墨长度分为 8 级:1 级石墨长 100mm、2 级石墨长 75mm、3 级石墨长 38mm、4 级石墨长 18mm、5 级石墨长 9mm、6 级石墨长 4.5mm、7 级石墨长 2.5mm、8 级石墨长 1.5mm</p> <p>3. 基体组织特征按其铸态或经热处理后状态分为七种:铁素体、片状珠光体、粒状珠光体、托氏体、粒状贝氏体、针状贝氏体、马氏体</p> <p>4. 珠光体片间距分为 4 级:1 级索氏体型珠光体、2 级细片状珠光体、3 级中等片状珠光体、4 级粗片状珠光体</p> <p>5. 珠光体数量百分比(珠光体 + 铁素体 = 100%),按大多数视场对照标准图片,按 A(薄壁铸件)、B(厚壁铸件)两组分为 8 级:1 级珠光体 98、2 级珠光体 95、3 级珠光体 90、4 级珠光体 80、5 级珠光体 70、6 级珠光体 60、7 级珠光体 50、8 级珠光体 40</p> <p>6. 碳化物分布形状分为四种:针条状、网状、块状、莱氏体状</p> <p>7. 碳化物数量百分比,按大多数视场对照图片,分为 6 级进行评定:1 级碳化物 1、2 级碳化物 3、3 级碳化物 5、4 级碳化物 10、5 级碳化物 15、6 级碳化物 20</p> <p>8. 磷共晶类型按其组成为 4 种:二元磷共晶、三元磷共晶、二元磷共晶-碳化物复合物及三元磷共晶-碳化物复合物</p> <p>9. 磷共晶分布形状分为 4 种:孤立块状、均匀分布、断续网状、连续网状</p> <p>10. 磷共晶数量的百分比,按大多数视场对照标准图片,分为 6 级进行评定:1 级磷共晶 1、2 级磷共晶 2、3 级磷共晶 4、4 级磷共晶 6、5 级磷共晶 8、6 级磷共晶 10</p> <p>11. 共晶团数量根据选择的放大倍数对照标准图片,按 A、B 两组分 8 级进行评定,见下表</p>

(续)

	级 别	直径 $\phi 70\text{mm}$ 图片中共晶团数量/个	
		放大 10 倍	放大 40 倍
检验方法	1	> 400	> 25
	2	≈ 400	≈ 25
	3	≈ 300	≈ 19
	4	≈ 200	≈ 13
	5	≈ 150	≈ 9
	6	≈ 100	≈ 6
	7	≈ 50	≈ 3
	8	< 50	< 3
检验规程	<p>1. 金相试样应取自抗拉试样距断口 10mm 处, 或从试棒的底部切除 10mm 后再切取金相试样, 试样尺寸应包括试棒半径的一半。由于特殊需要, 从铸铁件上取样时, 应在报告中注明取样位置、壁厚等情况。不允许直接从浇口或冒口上切取金相试样, 但特殊情况下允许在铸件表面上直接检验其金相组织</p> <p>2. 切取和制备金相试样时应注意保证不破坏铸铁的基体组织结构。热处理的铸铁件, 应随带同一处理条件的力学性能试样或特殊的试块, 从其上切取金相试样。在制备金相试样过程中应注意防止石墨夹杂不被剥落或变形, 试样表面应该光洁, 不允许有抛光时的条纹</p> <p>3. 试样的受检位置主要应在相当于试棒半径的 1/2 处, 用来浸蚀的试样检查石墨, 用浸蚀之后的试样检查金属基体, 显微检验时应首先通观整个受检面, 然后按大多数视场所示图像, 按评定每一检验项目内容的要求, 对应级别图评定</p> <p>4. 对石墨分布形状的观察, 应在未浸蚀的试样上进行, 放大倍数为 100 倍, 如在同一试样中有不同形状的石墨, 则应观察估计每种形状石墨的百分数, 并在报告中依次注明</p> <p>5. 对石墨长度的检验, 应在未浸蚀的试样上进行, 放大倍数为 100 倍, 选择有代表性的视场, 按其中最长的三条以上石墨的平均值评定, 被测量的视场不少于三个</p> <p>6. 对基体组织检验, 试样一般采用 2% ~ 5% 硝酸酒精溶液浸蚀, 放大倍数为 500 倍, 如果铸铁组织中有不同形式的基体组织时, 则应观察估计每种基体组织的数量, 在注明组织时指出</p> <p>7. 对珠光体片间距检验, 试样应用 2% ~ 5% 硝酸酒精溶液浸蚀, 放大倍数为 500 倍</p> <p>8. 对珠光体数量检验, 试样应用 2% ~ 5% 硝酸酒精溶液浸蚀, 放大倍数为 100 倍</p> <p>9. 对碳化物分布形状检验, 试样应用 2% ~ 5% 硝酸酒精溶液浸蚀, 放大倍数为 500 倍</p> <p>10. 对碳化物数量检验, 试样应用 2% ~ 5% 硝酸酒精溶液浸蚀, 放大倍数为 100 倍</p> <p>11. 对磷共晶类型检验, 试样一般采用 2% ~ 5% 硝酸酒精溶液浸蚀, 放大倍数为 500 倍</p> <p>12. 对磷共晶分布形状检验, 试样应用 2% ~ 5% 硝酸酒精浸蚀, 放大倍数为 100 倍</p> <p>13. 对磷共晶数量检验, 试样应用 2% ~ 5% 硝酸酒精溶液浸蚀, 放大倍数为 100 倍</p> <p>14. 对共晶团数量检验, 试样应用氯化铜 1g、盐酸 2mL、酒精 100mL 的溶液或硫酸铜 4g、盐酸 20mL、水 20mL 的溶液浸蚀, 放大倍数为 10 倍或 40 倍</p>		

表 8-65 球墨铸铁金相组织检验方法与规程

检验内容	显微组织、球化分级、石墨大小、珠光体粗细、珠光体数量、分散分布的铁素体数量、磷共晶数量和渗碳体数量
检验方法	<p>采用光学金相显微镜</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 按石墨的面积率划分石墨形态,面积率大于或等于 0.81 为球状石墨;面积率 0.80 ~ 0.61 为团状石墨;面积率 0.60 ~ 0.41 为团絮状石墨;面积率 0.40 ~ 0.10 为蠕虫状石墨,面积率小于 0.10 为片状石墨 2. 根据石墨形态及其分布和球化率,参考其对力学性能影响的趋势和工艺特点,将球化分为 6 级 3. 石墨大小分为 6 级:3 级、4 级、5 级、6 级、7 级、8 级 4. 珠光体粗细分为 3 级:粗片状珠光体、片状珠光体、细片状珠光体(珠光体粗细为非必检项目) 5. 珠光体数量按石墨大小分别 A、B 二级 12 级:珠光体 95、珠光体 85、珠光体 75、珠光体 65、珠光体 55、珠光体 45、珠光体 35、珠光体 25、珠光体 20、珠光体 15、珠光体 10、珠光体 5 6. 分散分布的铁素体数量,分块状(A)及网状(B)二组 6 级:铁素体 5、铁素体 10、铁素体 15、铁素体 20、铁素体 25、铁素体 30 7. 磷共晶数量分 5 级:磷共晶 0.5、磷共晶 1、磷共晶 1.5、磷共晶 2、磷共晶 3 8. 渗碳体数量分 5 级:渗碳体 1、渗碳体 2、渗碳体 3、渗碳体 5、渗碳体 10
检验规程	<ol style="list-style-type: none"> 1. 试样应与铸件同时浇注、同炉热处理的 U 形、V 形、敲落试块上截取,也可在铸件有代表性的部位上截取。截取和制备试样过程中应防止组织发生变化,试样表面应光洁,不允许有粗大的划痕 2. 试样抛光后检验石墨,经 2% ~ 5% 硝酸酒精溶液浸蚀后检验基体组织,放大倍数除评定珠光体粗细为 500 倍外,其余检验项目均为 100 倍 3. 检验球化分级时,应首先观察整个受检面,然后从差的区域开始,连续观察五个视场,以其中三个差的视场的多数对照级别图评定;检验石墨大小、珠光体数量,分散分布的铁素体数量时,应以大多数视场对照相应的级别图评定;检验磷共晶及渗碳体的数量时,应以含量最多的视场评定 4. 检验结果表示方法:球化分级以石墨形态及其分布和球化率来划分;石墨大小以级别表示;珠光体粗细,以渗碳体和铁素体的片间距来划分,以相应的级别名称表示;珠光体数量,分散分布的铁素体数量、磷共晶数量及渗碳体数量用相应的级别名称或百分数来表示

表 8-66 珠光体球墨铸铁铸件感应淬火金相组织检验方法与规程

检验内容	硬化层金相组织及层深的检验
检验方法	<p>采用光学金相显微镜</p> <p>硬化层金相组织分为八级:1 级粗马氏体,大块状残留奥氏体、莱氏体、球状石墨;2 级粗马氏体,大块状残留奥氏体、球状石墨;3 级马氏体,块状残留奥氏体,球状石墨;4 级马氏体,少量点状残留奥氏体、球状石墨;5 级细马氏体、球状石墨;6 级细马氏体,少量未溶铁素体、球状石墨;7 级微细马氏体,少量未溶珠光体、未溶铁素体、球状石墨;8 级微细马氏体,较多量未溶珠光体,未溶铁素体、球状石墨。3 ~ 6 级为合格</p>
检验规程	<ol style="list-style-type: none"> 1. 取样在铸件感应淬火区中部或铸件技术要求的部位截取。试样的抛光面应与表面垂直,用含有体积分数为 2% ~ 5% 硝酸酒精溶液浸蚀,直到显示出清晰的硬化层为止。试样在制备过程中不应改变原有的金相组织 2. 硬化层金相组织,放大 400 倍观察 3. 硬化层深度放大 100 倍测量

表 8-67 蠕墨铸铁金相组织检验方法与规程

检验内容	石墨形态、蠕化率、珠光体数量、磷共晶类型及数量、碳化物类型及数量
检验方法	<p>采用光学金相显微镜</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 石墨形态为蠕虫状石墨,在生产中可能出现卷曲状石墨和珊瑚状石墨,它们不是蠕虫状石墨 2. 蠕化率分 9 级。每一级的名称和蠕虫状石墨含量如下:蠕虫状石墨 95 > 90%、蠕虫状石墨 85 > 80% ~ 90%、蠕虫状石墨 75 > 70% ~ 80%、蠕虫状石墨 65 > 60% ~ 70%、蠕虫状石墨 55 > 50% ~ 60%、蠕虫状石墨 45 > 40% ~ 50%、蠕虫状石墨 35 > 30% ~ 40%、蠕虫状石墨 25 > 20% ~ 30%、蠕虫状石墨 15 > 10% ~ 25% 3. 珠光体数量分为 10 级,名称及珠光体数量如下:珠光体 95 > 90%、珠光体 85 > 80% ~ 90%、珠光体 75 > 70% ~ 80%、珠光体 65 > 60% ~ 70%、珠光体 55 > 50% ~ 60%、珠光体 45 > 40% ~ 50%、珠光体 35 > 30% ~ 40%、珠光体 25 > 20% ~ 30%、珠光体 15 > 10% ~ 20%、珠光体 5 > 10% 4. 磷共晶类型分 4 类:二元磷共晶、三元磷共晶、二元磷共晶复合物和三元磷共晶复合物 5. 磷共晶数量分 5 级:磷共晶 0.5 ≈ 0.5%、磷共晶 1 ≈ 1%、磷共晶 2 ≈ 2%、磷共晶 3 ≈ 3%、磷共晶 5 ≈ 5% 6. 碳化物类型常见有三类:莱氏体碳化物、块状碳化物和条状碳化物 7. 碳化物数量按百分比分 6 级:碳化物 1 ≈ 1%、碳化物 2 ≈ 2%、碳化物 3 ≈ 3%、碳化物 5 ≈ 5%、碳化物 7 ≈ 7%、碳化物 10 ≈ 10%
检验规程	<ol style="list-style-type: none"> 1. 用光学显微镜在未浸蚀的试样上观察二维形态,试样深腐蚀后在电子显微镜下观察蠕虫状石墨的三维形态 2. 观察蠕化率在未浸蚀的试样上进行,放大倍数为 100 倍 3. 珠光体数量试样用 2% ~ 5% 硝酸酒精溶液浸蚀,放大倍数为 100 倍 4. 磷共晶类型试样用 2% ~ 5% 硝酸酒精溶液浸蚀,放大倍数为 400 倍 5. 磷共晶数量及碳化物数量试样用 2% ~ 5% 硝酸酒精溶液浸蚀,放大倍数为 100 倍 6. 碳化物类型试样用 2% ~ 5% 硝酸酒精溶液浸蚀,放大倍数为 400 倍

表 8-68 铁素体可锻铸铁金相组织检验方法与规程

检验内容	显微组织、石墨形状及分级、石墨分布、石墨颗粒、珠光体形状、珠光体残留量分级、渗碳体残留量分级、表皮层厚度
检验方法	<p>采用光学金相显微镜</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 石墨形状有:团絮状、团球状、絮状、聚虫状及枝晶状 2. 石墨形状分为 5 级 3. 石墨分布分为 3 级 4. 石墨颗数分为 5 级:1 级 > 150 颗/mm、2 级 > 110 ~ 150 颗/mm、3 级 > 70 ~ 110 颗/mm、4 级 > 30 ~ 70 颗/mm、5 级 ≤ 30 颗/mm 5. 珠光体形状有片状和粒状两种 6. 珠光体残余量分 5 级:1 级 ≤ 10%、2 级 > 10% ~ 20%、3 级 > 20% ~ 30%、4 级 > 30% ~ 40%、5 级 > 40% 7. 渗碳体残余量分 2 级:1 级 ≤ 2%、2 级 > 2% 8. 表皮层厚度分为 4 级:1 级 ≤ 1.0mm、2 级 > 1.0 ~ 1.5mm、3 级 > 1.5 ~ 2.0mm、4 级 > 2.0mm
检验规程	<ol style="list-style-type: none"> 1. 石墨形状及分级、石墨分布、石墨颗粒应在未浸蚀的试样上进行,放大倍数为 100 倍 2. 珠光体形状、珠光体残余量分级、渗碳体残余量应在浸蚀后的试样上进行、放大倍数为 100 倍

表 8-69 中锰抗磨球墨铸铁金相组织检验方法与规程

检验内容	石墨球化等级、碳化物数量、碳化物类型、索氏体数量、马氏体数量、马氏体类型、奥氏体数量、磷共晶类型
检验方法	<p>采用光学金相显微镜</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 石墨球化等级分为 5 级 2. 碳化物数量以百分比分为 5 级:1 级 5%、2 级 10%、3 级 15%、4 级 20%、5 级 30% 3. 碳化物类型分为 6 类:粒状、粒块状、断续网状、共晶状、连续网状、初生条状 4. 索氏体数量以百分比分为 7 级:1 级 5%、2 级 10%、3 级 15%、4 级 20%、5 级 30%、6 级 40%、7 级 50% 5. 马氏体数量分为 4 级:1 级约 30%、2 级约 40%、3 级约 50%、4 级约 70% 6. 马氏体类型分为 3 类:细针、较细针、粗针 7. 奥氏体数量以百分比分为 6 级:1 级 10%、2 级 20%、3 级 30%、4 级 40%、5 级 50%、6 级 60% 8. 磷共晶类型分为 5 类:二元磷共晶、二元磷共晶—碳化物复合物、三元磷共晶、三元磷共晶—碳化物复合物、二元—三元复合磷共晶
检验规程	<ol style="list-style-type: none"> 1. 对石墨评级的观察,应在未浸蚀的试样上按大多数视场对照图片进行评定。放大倍数为 100 倍 2. 碳化物数量评定,试样用 10% 硝酸酒精溶液浸蚀,图片放大倍数为 100 倍 3. 碳化物类型试样用 4% 或 10% 硝酸酒精溶液浸蚀,图片放大倍数为 500 倍 4. 索氏体数量评定,试样用 1% 或 2% 硝酸酒精溶液浸蚀。图片放大倍数为 100 倍,相应对照图片为 500 倍 5. 马氏体数量评定,试样用 3% 硝酸酒精溶液浸蚀。图片放大倍数为 100 倍 6. 马氏体类型试样用 3% 或 10% 硝酸酒精溶液浸蚀。图片放大倍数为 500 倍 7. 奥氏体数量评定,试样用 4% 或 10% 硝酸酒精溶液浸蚀。图片放大倍数为 100 倍,相应对照图片为 500 倍 8. 磷共晶类型,试样用 4% 硝酸酒精溶液浸蚀。图片放大倍数为 500 倍

表 8-70 稀土镁球墨铸铁等温淬火金相组织检验方法与规程

检验内容	金相组织形态、组织分级和白区、铁素体区的数量分级
检验方法	<p>采用光学金相显微镜</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 经等温淬火处理得到以贝氏体为主的基体组织。常见的组织形态有:下贝氏体、上贝氏体、下贝氏体 + 马氏体、贝氏体 + 铁素体 2. 等温淬火时等温温度不同,将贝氏体分为上贝氏体和下贝氏体二类。下贝氏体按长度分为 5 级:1 级细小针状 $\leq 10\mu\text{m}$、2 级细针状 $> 10 \sim 20\mu\text{m}$、3 级中等针状 $> 20 \sim 30\mu\text{m}$、4 级粗针状 $> 30 \sim 40\mu\text{m}$、5 级粗大针状 $> 40\mu\text{m}$。上贝氏体分为 5 级:1 级细小羽毛状 $\leq 10\mu\text{m}$、2 级细羽毛状 $> 10 \sim 20\mu\text{m}$、3 级中等羽毛状 $> 20 \sim 30\mu\text{m}$、4 级粗羽毛状 $> 30 \sim 40\mu\text{m}$、5 级粗大羽毛状 $> 40\mu\text{m}$ 3. 白区指等温淬火后出现的马氏体和残留奥氏体组织。通常它分布在球墨铸铁共晶团的边界上、白区数量分为 4 级:1 级 $\leq 5\%$、2 级 $> 5\% \sim 10\%$、3 级 $> 10\% \sim 15\%$、4 级 $> 15\%$ 4. 铁素体数量分为 3 级:1 级 $\leq 5\%$、2 级 $> 5 \sim 10\%$、3 级 $> 10\%$
检验规程	<ol style="list-style-type: none"> 1. 检查组织形态及贝氏体的试样用 2% ~ 4% 硝酸酒精溶液浸蚀,放大 500 倍观察 2. 检查白区及铁素体数量的试样用 2% ~ 4% 硝酸酒精溶液浸蚀,放大 100 倍观察

2. 铸铁件热处理缺陷分析与防止(表 8-71 ~ 表 8-73)

表 8-71 灰铸铁件热处理缺陷分析及其防止

缺 陷	原因分析	防止方法
温裂(开裂处金属表皮氧化,可用外观检查、透光法、磁力探伤、打压试验、煤油渗透等方法发现)	热处理不当,温差应力大所引起	正确制订合理的热处理规范
变形(长的或扁平类铸件在靠近壁厚的一方凹入,成弯曲形,可用外观检查、划线等方法发现)	1. 在铸件冷却过程中,产生的铸造应力超过该材质的屈服强度时,则产生塑性变形和挠曲 2. 为减少和消除铸件的残留应力,可采用人工时效,若热处理规范不正确,仍会产生变形和挠曲	改变热处理规范,使其合理
金相不合格(铸件断面的粗组织和显微组织不符合标准或技术要求,可用断面观察或金相检查予以发现)	热处理规范不正确	改变热处理规范,使其合理
硬度过低(铸件低温退火后,硬度过低)	退火加热温度过高,使渗碳体分解	再进行一次正火,然后按正常工艺低温退火
硬度过高(消除白口组织退火后,硬度仍然很高)	退火温度过低,或保温时间过短,或冷却速度过快	重新退火,严格控制保温温度和时间,注意冷速

表 8-72 球墨铸铁件热处理缺陷分析及其防止

缺 陷	原因分析	防止方法
畸 变	1. 支垫不良(支点少、未垫实) 2. 加热温度不均匀,冷速过快,热应力过大 3. 摆放不正,或铸件与铸件互相挤压 4. 淬火时冲击碰撞 5. 热处理前已存在畸变	1. 合理增加支点,仔细垫实,立装件应垂直放置,薄壁箱体件上部应避免压铸件 2. 铸件成垛装炉,支垫面不得有飞边、毛刺、凸起物 3. 易变形件入炉前先划线检查,装炉时针对变形情况支压 4. 刚出炉件不得吊放在穿堂风口冷却
裂纹(加热前或加热时产生的裂纹,表面有氧化皮;冷却时产生的裂纹,表面无氧化皮)	1. 铸件入炉前就有较大的内应力 2. 铸件入炉时炉温过高,或低温时加热速度过快,产生的热应力较大 3. 调质淬火应力较大或回火入炉温度高,升温速度过快 4. 入炉前铸件已裂	1. 严格控制入炉温度,低温阶段加热速度应缓慢 2. 气割易裂件的冒口时,应增大气割余量 3. 严格控制淬火件入水温度、水中停留时间与水温;回火入炉温度应低,加热速度应慢
过热与过烧(过热使晶粒变得粗大,塑性与韧性很低;过烧使晶粒周界处有熔化或烧毁现象)	1. 加热温度过高,或高温阶段保温时间过长 2. 炉温不均,铸件局部温度过高	避免加热温度过高,避免将火焰集中在铸件局部区域

(续)

缺 陷	原因分析	防止方法
氧化与脱碳	1. 加热时炉温较高,过剩空气量大 2. 炉内气氛呈氧化性	1. 避免加热温度过高和保温时间过长 2. 控制炉气为中性或还原性(燃料内水分含量要低,助燃的风量要适当) 3. 铸件表面涂防氧化涂料或采用防护罩或铁屑、木炭等将铸件与炉气隔离
正火或退火后硬度过高	1. 石墨化退火温度或奥氏体化正火温度选择不当,偏低 2. 冷却速度太快	根据铸态组织中游离渗碳体的情况正确选择合适的低温或高温石墨化退火规范;正确选择合适的低温或高温正火规范
淬火回火后硬度过高或过低	1. 硬度高是因为回火温度低或保温时间不足 2. 硬度低是因为回火温度过高或保温时间过长 3. 有时是因为淬火加热温度不足或冷却速度过慢	1. 严格控制淬火加热温度,保证入水温度和水中的停留时间 2. 掌握回火温度和时间

表 8-73 可锻铸铁热处理缺陷分析及其防止

缺 陷	原因分析	防止方法
回火脆性(铸件在退火后或热镀锌后,冲击韧性很低,断口呈灰白色,但金相组织仍为铁素体和团絮状石墨。用高倍显微镜观察,晶界上可见到小黑点)	1. 化学成分中磷含量偏高(含硅高时更易产生),铁素体晶界上析出磷化物 2. 退火后,出炉温度偏低(450 ~ 500℃),铁素体晶界上析出三次渗碳体 3. 热镀锌液温度在“回火脆性”危险区内(450 ~ 500℃),浸镀后,冷却速度又缓慢	1. 高硅成分时应把磷含量控制在低范围 2. 退火后出炉温度应在 650℃ 以上 3. 热镀后冷却速度要快。对已出现“回火脆性”的镀锌铸件,可重新在 600℃ 左右浸镀,然后快速冷却,即可消除“回火脆性”;不需热镀锌的铸件,也可以采用加热方法,在 650 ~ 700℃ 保温后,快速出炉冷却,消除“回火脆性”
退火不足(铸件断口有白口组织或中心已成黑绒状,但边缘尚有白口,金相观察在白口部位,可见到渗碳体,黑绒状部位为铁素体和石墨。其质地硬而脆,另一种是铁素体可锻铸铁中残留有珠光体)	1. 第一阶段石墨化温度过低或时间不足,致使渗碳体不能完全分解,或因退火炉内温差过大及灰尘堆积难使铸件升温 2. 硅含量低,锰硫比不当或铬含量高 3. 生产铁素体可锻铸铁时,由于第二阶段保温温度没有控制在规定的范围内,珠光体分解不完全,断口出现亮白点	1. 第一阶段的加热温度不应过低,炉内温差要小,积灰要少,升温至 800℃ 以上时,应放慢升温速度以使炉温均匀,退火过程中随时检查试片,发现退火不足时,应适当延长保温时间 2. 严格控制化学成分,当硅、铬高或锰硫比配合不当时,应适当延长第一阶段保温时间或提高温度 3. 第二阶段的保温温度应控制在规定的范围内,使珠光体完全分解

(续)

缺 陷	原因分析	防止方法
氧化皮过量(退火后铸件表面出现紫黑色氧化皮层,严重时表皮起泡,凸凹不平;用氧化铁填料退火的白心可锻铸铁件表面出现薄层氧化皮,但表面光滑,经清理后有时局部翘皮)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 退火箱封闭不严 2. 温度过高或退火箱烧坏 3. 填料的氧化性过强或第一阶段保温时间过长 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 封严退火箱 2. 防止温度过高,退火时间过长,以致烧毁退火箱 3. 坏退火箱应及时更换 4. 使用氧化铁填料时应掺一部分旧填料,严格控制保温时间
过烧(铸件断口在外围有结晶粗大的白亮珠光体组织,内部为黑绒状铁素体组织。严重过烧时,断口全部呈结晶粗大的白亮珠光体组织。硬度明显提高,给攻螺纹、套螺纹等带来困难)	第一阶段保温时间过长或温度过高	第一阶段保温时间不能过长,温度不能太高,并且炉内温度偏差不能太大
畸变(退火后,铸件外形发生弯曲、翘曲和其他畸变)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 铸件结构不合理,内应力过大 2. 铸件退火时受到重压 3. 退火中石墨化膨胀 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 改进铸件结构 2. 铸件安放时,避免重压,并留有适当空隙 3. 退火温度不宜过高 4. 已变形的铸件,可采用整形方法纠正

第 9 章 非铁金属和合金的热处理

9.1 铜和铜合金的热处理及性能(表 9-1 ~ 表 9-59,图 9-1 ~ 图 9-31)

表 9-1 铜合金种类和特点

大 类	小 类	主 要 成 分	特 点
黄铜 (Cu-Zn 合金)	铅黄铜	Cu-Zn 合金中加 <3% 的 Pb	耐磨性好,可加工性好
	锡黄铜	Cu-Zn 合金中加 Sn < 1%	少量 Sn 可提高合金强度、硬度,抑制脱 Zn 提高耐蚀性,加 As0.03% ~ 0.05% 可进一步提高在淡水和海水中的耐蚀性,加工、铸造,力学性能均好,再加入微量 Sb、Be、P、As、Si、Ni 可进一步提高耐蚀性
	铝黄铜	Cu-Zn 合金中加 Al < 4%	Fe 能细化晶粒,阻止其长大,提高力学、工艺性能,再配合加入 Mn、Sn、Pb、Ni 可提高强度和在大气、海水中的耐腐蚀性
	铁黄铜	Cu-Zn 合金中加 Fe < 1.5%	Ni 细化晶粒,提高强度和耐蚀性,压力加工性好,可施行热处理强化,800℃ 固溶、350 ~ 400℃ 时效,200 ~ 250HBW
	镍黄铜	Cu-Zn 合金中加 Ni	Mn 起固溶强化作用,提高在海水中的耐蚀性,再加 Fe 可细化组织,提高强度、韧性、耐磨性、耐海水腐蚀性。
	锰黄铜	Cu-Zn 合金中加 Mn	在大气和海水中耐腐蚀、抗应力腐蚀能力强,力学性能、铸造性能、焊接性和压力加工性能好
	硅黄铜	Cu-Zn 合金中加 Si	
青铜	锡青铜	Cu-Sn 合金,加 少量 P、Zn、Pb	Zn 全溶解,不形成新相,可提高力学性能和流动性以及致密性。Pd 不溶解,可提高耐磨性,致密度,改善切削加工性,Ni 细化晶粒,强化基体,P 可脱氧,金属型浇注性能好,出现 S 相变脆。
	铝青铜	Cu-Al 合金,加 Fe、Ni、Mn	Fe 细化晶粒,提高强度、硬度、耐磨性,在 Cu-Al-Fe 青铜中加 Mn,可提高强度,耐蚀耐磨性,Ni 提高室温和高温强度,Cu-Al-Fe-Ni 青铜可热处理强化
	硅青铜	Cu-Si 合金,加 Mn、Ni、Sn、Zn	流动性好,致密,Mn 可提高力学性能、工艺性和耐蚀性。Ni 和 Si 形成 Ni ₂ Si 强化相,可固溶时效强化,加 Sn < 0.5% 提高耐蚀性,Zn 溶于 α 相可提高强度,改善熔注性能
	铍青铜	Cu-Be 合金,含 Be < 2% 为变形合金、 Be2.5% 为铸造合金	高强度、硬度、耐磨、耐蚀、抗疲劳、导电导热性好,撞击不产生火花。Be 昂贵有毒,固溶时效强化效果好
	钛青铜	Cu-Ti 合金	强化、力学性能接近铍青铜,生产工艺简单,无毒
	铅青铜	Cu-Pb 合金	作为高压高速下的耐磨材料,疲劳强度高,冲击不易开裂,导热性高,铸造易偏析,加入 Sn15% 可作为铸造轴承合金
	锰青铜	Cu-Mn 合金	热强度高、塑性、耐蚀性好
	铬青铜	Cu-Cr 合金	属耐热铜合金、可热处理强化、导电导热性好
	镉青铜	Cu-Cd 合金	力学性能高,耐磨、耐蚀、导电导热性和可加工性好
	锆青铜	Cu-Zr 合金	导电性、力学性能、耐热性好、弹性模量高,可加工性好

(续)

大 类	小 类	主 要 成 分	特 点
白铜	普通白铜	Ni < 50%	纯铜加 Ni 可显著提高强度,耐蚀、电阻和热电性。在海水、有机酸和各种盐液中稳定
	铁白铜	Cu-Ni 合金中加少量 Fe	晶粒细、强度高、耐蚀性好,可作为海船耐腐蚀件
	锌白铜	Cu-Ni 合金中加 Zn13% ~ 45%	Zn 起固溶强化作用,提高耐蚀性,力学性能好,便宜、美观、加 Pb < 2% 和微量 Se 和 Te 能改善可加工性
	铝白铜	Cu-Ni 合金中加 Al	力学性能高,耐蚀性、弹性好,低温性能高,Al 在合金溶解度随温度降低减小,可热处理强化
	锰白铜	Cu-Ni 合金中加 Mn	随 Mn 量不同有“锰铜”、“康铜”和“考铜”之分,锰铜塑性好,电阻高,电阻系数小。康铜电阻大,电阻系数小和 Cu、Fe、Ag 接触热电势高,可作为热电偶材料,考铜与康铜类似,可做变阻器、热电偶和补偿导线
	其他	Cu-Ni 合金中加微量 Ti、Zr、Nb、Mo	改善合金铸造组织,提高热塑性、强度和高温性能,有利于改善焊接性和耐蚀性

注:成分均指质量分数。

表 9-2 铜合金退火时常用的炉气类型

材 料	退火用炉气类型	使用注意事项
锌含量小于 15% 的黄铜、铝青铜	1. 含 H ₂ 2% 的燃烧氨气 2. 含 H ₂ 2% ~ 5% 和 CO 的不完全燃烧炉气 3. 水蒸气	1. 使用水蒸气时,蒸汽管道中的积水必须排出方能通气,为防止冷却时合金表面产生水迹,冷却时用不完全燃烧的炉气保护 2. 使用分解氨气时,通过燃烧来减少氢含量,将其中的水蒸气完全排除 3. 使用氨气时必须除去氧,以防止爆炸 4. 在大批量生产中可采用真空(含 Zn 较高的合金除外)或低真空($10^{-2} \times 133.322\text{Pa}$)与通入氮或氢气相配合
锌含量小于 15% 的黄铜和锌白铜	强还原性气氛,或采用快速退火方法以减少氧化	
锡青铜及含 Sn 及 Al 的低锌铜合金	不含 H ₂ S 的中等还原性气氛	
铝青铜、铬青铜、硅青铜、铍青铜	纯氢或分解氨	

注:含量均指质量分数。

表 9-3 一些变形铜合金去应力退火的温度

牌 号	退火温度/℃	牌 号	退火温度/℃	牌 号	退火温度/℃
H96	150 ~ 170	HPb59—1	280	QA17	300 ~ 360
H90	200	HSn70—1	300 ~ 350	B19、B30	250 ~ 300
H80	200 ~ 210	HSn62—1	350 ~ 370	BMn3—12	250 ~ 370
H68	250 ~ 260	QSn6.5—0.1	180 ~ 220	BZn15—20	250 ~ 300
H62	260 ~ 270	QSn6.5—0.4	250 ~ 270		

注:保温时间一般为 1 ~ 2h(材料厚度约 20mm),采用较高的去应力退火温度,可适当缩短保温时间。

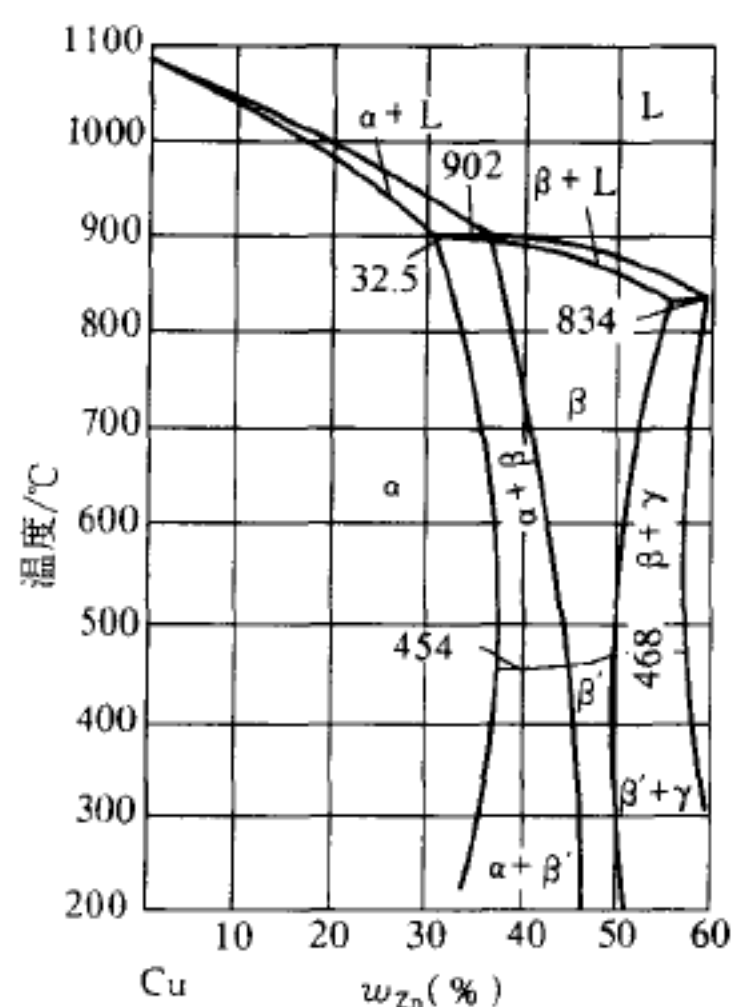


图 9-1 铜锌合金相图

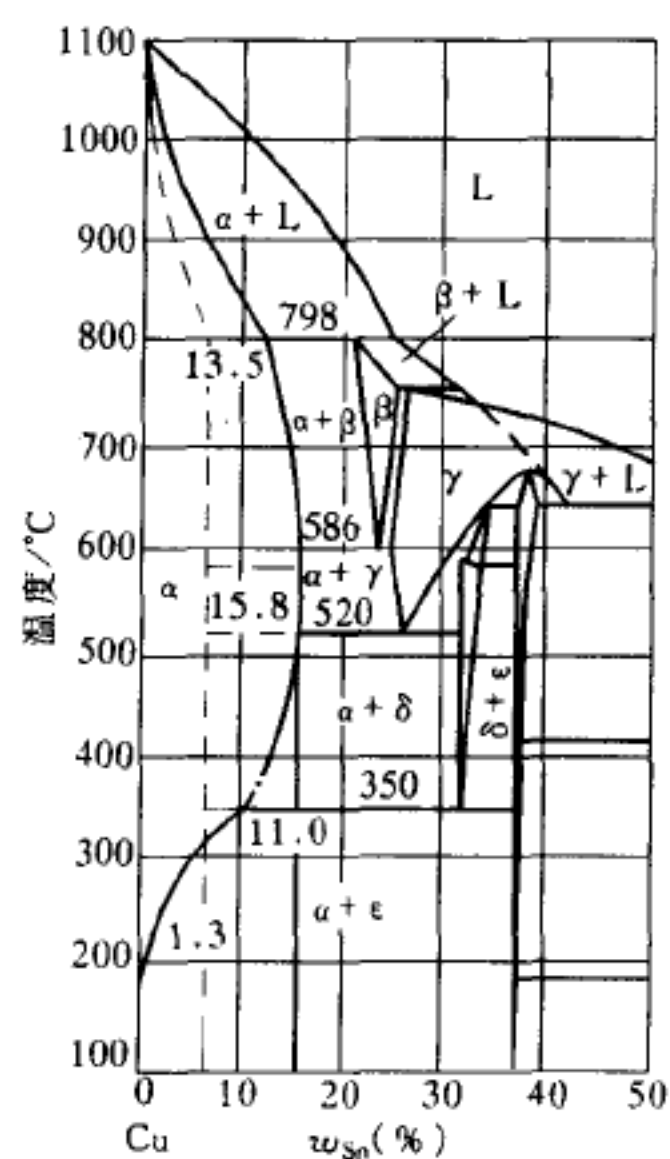


图 9-2 铜锡合金相图

实线为普通退火状态

虚线为铸造状态

点划线为经压力加工后退火千小时的平衡状态

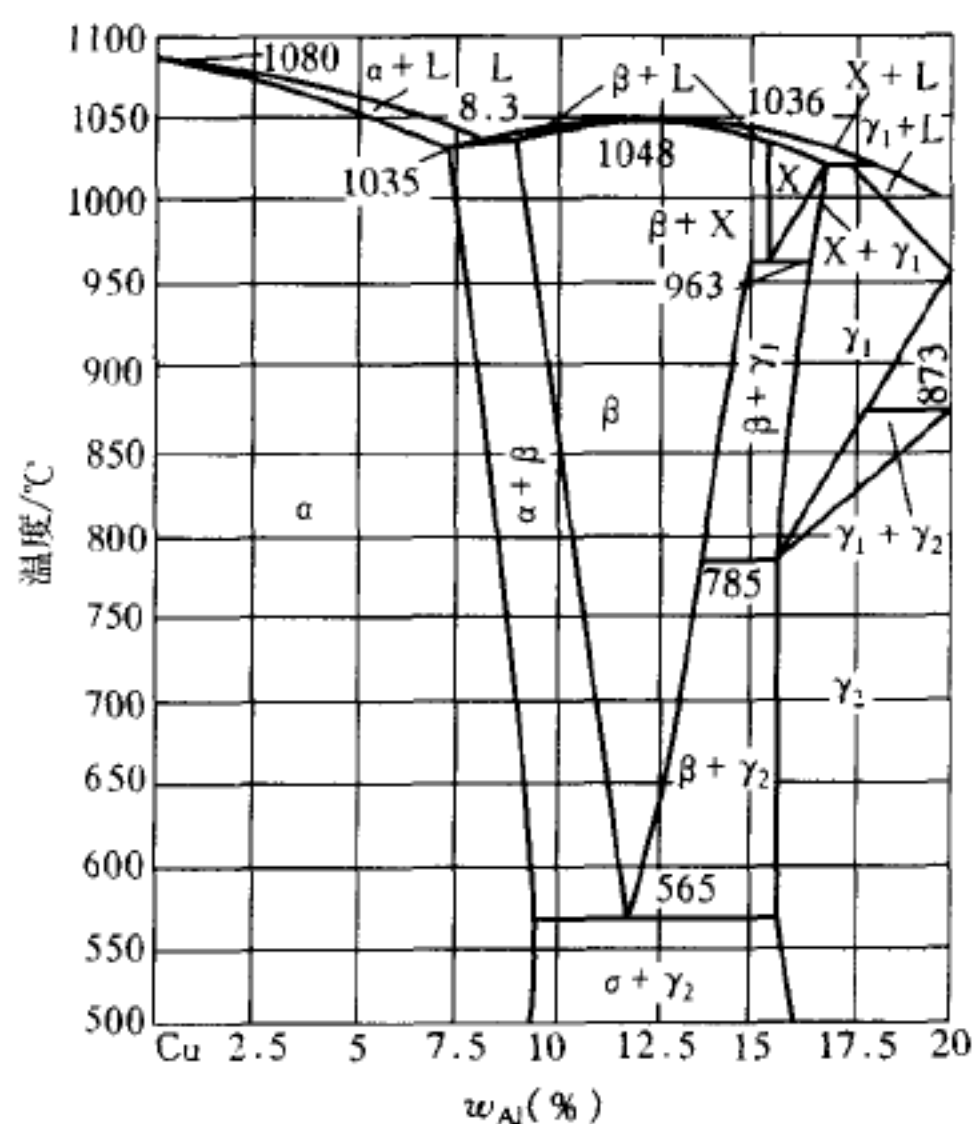


图 9-3 铜铝合金相图

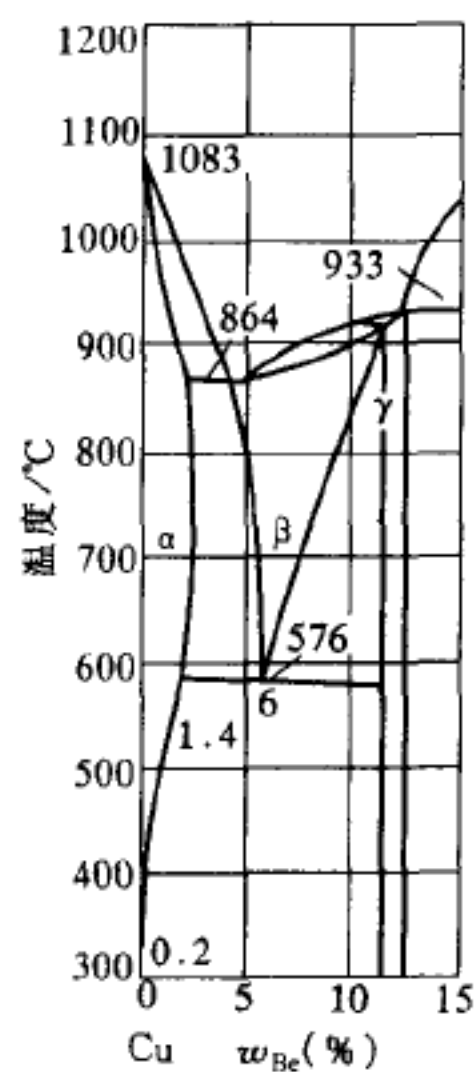


图 9-4 铜铋合金相图

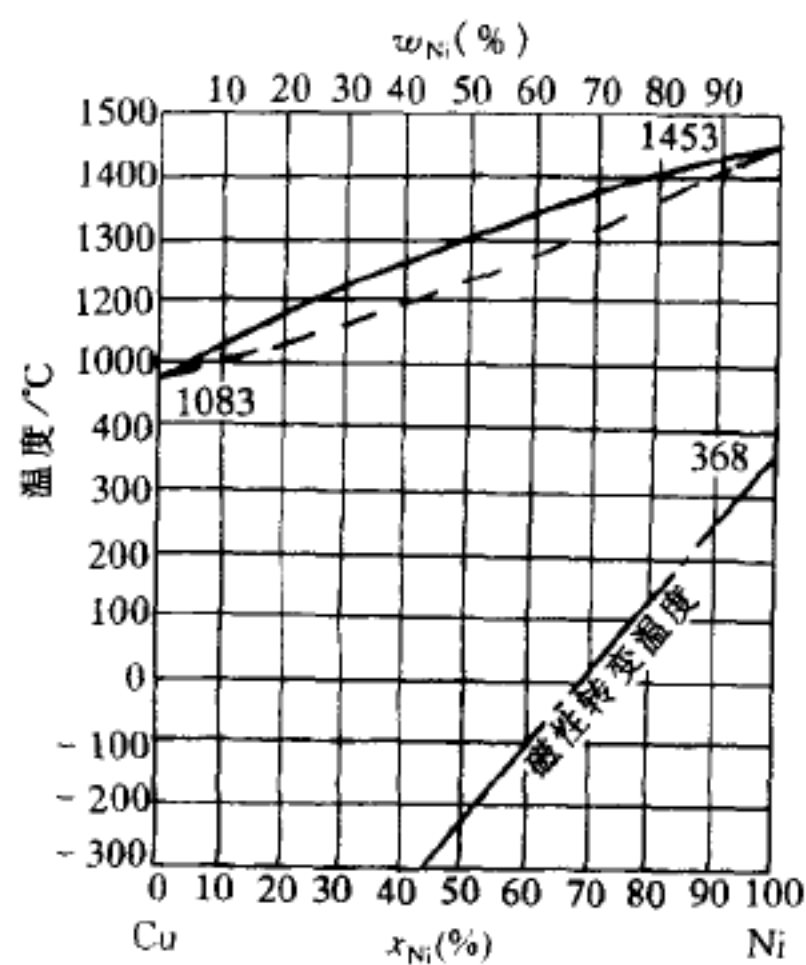


图 9-5 铜镍合金相图

表 9-4 纯铜管材、棒材、带材、线材的退火温度

产品类型	牌 号	规格/mm	退火温度 /℃	保温时间 /min
管 材	T2、T3 T4、TP1、 TU1、TU2	$\phi \leq 1.0$	470 ~ 520	40 ~ 50
		$\phi 1.05 \sim 1.75$	500 ~ 550	50 ~ 60
		$\phi 1.8 \sim 2.5$	530 ~ 580	50 ~ 60
		$\phi 2.6 \sim 4.0$	550 ~ 600	50 ~ 60
		$\phi > 4.0$	580 ~ 630	60 ~ 70
线 材	T2	T2、TU1、TU2、TP1	550 ~ 620	60 ~ 70
		$\phi \leq 0.09$	290 ~ 340	
		$\phi 0.1 \sim 0.25$	340 ~ 380	
		$\phi 0.3 \sim 0.55$	350 ~ 410	
		$\phi 0.6 \sim 1.2$	380 ~ 440	
线 材	T2、T3、T4	$\phi 0.3 \sim 0.8$	410 ~ 430	

表 9-5 黄铜冷加工中间退火温度

牌 号	退 火 温 度 /℃			
	$\delta > 5\text{mm}$	$\delta = 1 \sim 5\text{mm}$	$\delta = 0.5 \sim 1\text{mm}$	$\delta < 0.5\text{mm}$
H96	560 ~ 600	540 ~ 580	500 ~ 540	450 ~ 550
H90、HSn70—1	650 ~ 720	620 ~ 780	560 ~ 620	450 ~ 560
H80	650 ~ 700	580 ~ 650	540 ~ 600	500 ~ 560
H68	580 ~ 650	540 ~ 600	500 ~ 560	440 ~ 500
H62、H59	650 ~ 700	600 ~ 660	520 ~ 600	460 ~ 530
HFe59—1—1	600 ~ 650	520 ~ 620	450 ~ 550	420 ~ 480
HMn58—2	600 ~ 660	580 ~ 640	550 ~ 600	500 ~ 550
HSn70—1	600 ~ 650	560 ~ 620	470 ~ 560	450 ~ 500
HSn62—1	600 ~ 650	550 ~ 630	520 ~ 580	500 ~ 550
HPb63—3	600 ~ 650	540 ~ 620	520 ~ 600	480 ~ 540
HPb59—1	600 ~ 650	580 ~ 630	550 ~ 600	480 ~ 550

注： δ —截面厚度。

表 9-6 黄铜管材、棒材再结晶退火温度

产品类型	牌 号	退 火 温 度 /℃		
		硬	拉制或半硬	软
管 材	H96			550 ~ 600
	H80			480 ~ 550
	H68、H62	340	400 ~ 450(半硬)	
	HPb59—1、HSn70—1		420 ~ 500(半硬)	
	H62 圆型、矩型波导管	200 ~ 250		
棒 材	H96			550 ~ 620
	H90、H80、H70		250 ~ 300	650 ~ 720
	H68		350 ~ 400	500 ~ 550
	H62、HSn62—1		400 ~ 450	
	H59—1、HFe59—1—1		350 ~ 400	
	HMn58—2		320 ~ 370	

表 9-7 黄铜线材的再结晶退火温度

牌 号	规格范围/mm	退 火 温 度 /℃		
		硬	半 硬	软
H96	0.3 ~ 0.6			390 ~ 410
H90、H80	0.3 ~ 6.0	160 ~ 180		390 ~ 410
H68	0.3 ~ 6.0	160 ~ 180	350 ~ 370	460 ~ 480
H62	0.3 ~ 1.0	160 ~ 180	160 ~ 180	390 ~ 410
	1.1 ~ 4.8	160 ~ 180	240 ~ 260	390 ~ 410
	5.0 ~ 6.0	160 ~ 180	260 ~ 280	390 ~ 410
HPb59—1	0.5 ~ 6.0	250 ~ 270	330 ~ 350	410 ~ 430
HMn58—2、HSn62—1、HFe59—1—1	0.3 ~ 6.0	160 ~ 180		390 ~ 410

表 9-8 锡青铜中间退火温度

牌 号	退 火 温 度 /℃			
	$\delta > 5\text{mm}$	$\delta = 1 \sim 5\text{mm}$	$\delta = 0.5 \sim 1\text{mm}$	$\delta < 0.5\text{mm}$
QSn4—3	600 ~ 650	580 ~ 630	500 ~ 600	460 ~ 500
QSn4—4—2.5	580 ~ 650	550 ~ 620	520 ~ 680	450 ~ 520
QSn7—0.2	620 ~ 680	600 ~ 650	530 ~ 620	500 ~ 580
QSn6.5—0.1	600 ~ 660		520 ~ 580	470 ~ 530
QSn6.5—0.4				

注： δ —材料厚度。

表 9-9 锡青铜棒材及线材成品退火温度

牌 号	规 格	退 火 温 度 /℃	
		硬	软
QSn6.5—0.1	棒 材	250 ~ 300	
QSn6.5—0.4			
QSn7—0.2	0.3 ~ 0.6 线材		420 ~ 440

表 9-10 几种两相铝青铜的热处理工艺

牌 号	退火温度/℃	固溶处理温度/℃	时效温度/℃	硬度 HBW
QA19—2	650 ~ 750	800	350	150 ~ 187
QA19—4	700 ~ 750	950	250 ~ 300(2 ~ 3h)	170 ~ 180
QA110—3—1.5	650 ~ 750	830 ~ 860	300 ~ 350	207 ~ 285
QA110—4—4	700 ~ 750	920	650	200 ~ 240
QA111—6—6	—	925(保温 1.5h)	400(24h 空冷)	365HV

表 9-11 各种冷成型用退火铜合金的标准晶粒度^①

标准晶粒度/mm	用 途	标准晶粒度/mm	用 途
0.015	轻度成型	0.050	深冲件
0.025	轻冲件	0.070	冲压厚工件
0.035	冲压后有高度光滑表面		

^① 单相铜合金晶粒度测定方法可参阅 GB/T6394—1986。

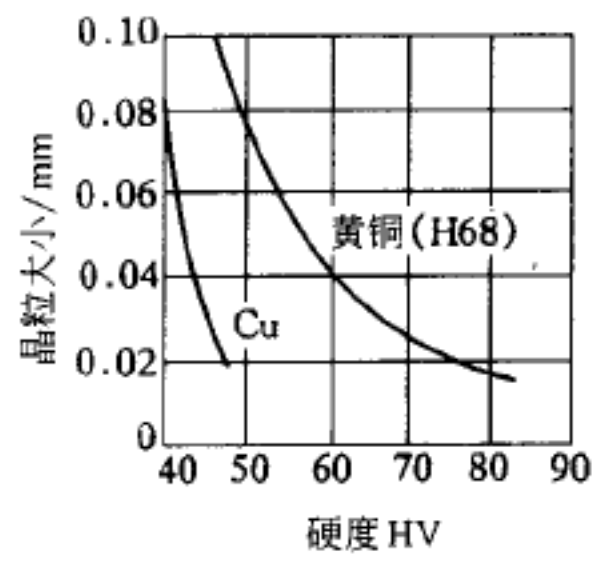


图 9-6 纯铜及黄铜(H68)晶粒大小与硬度的关系

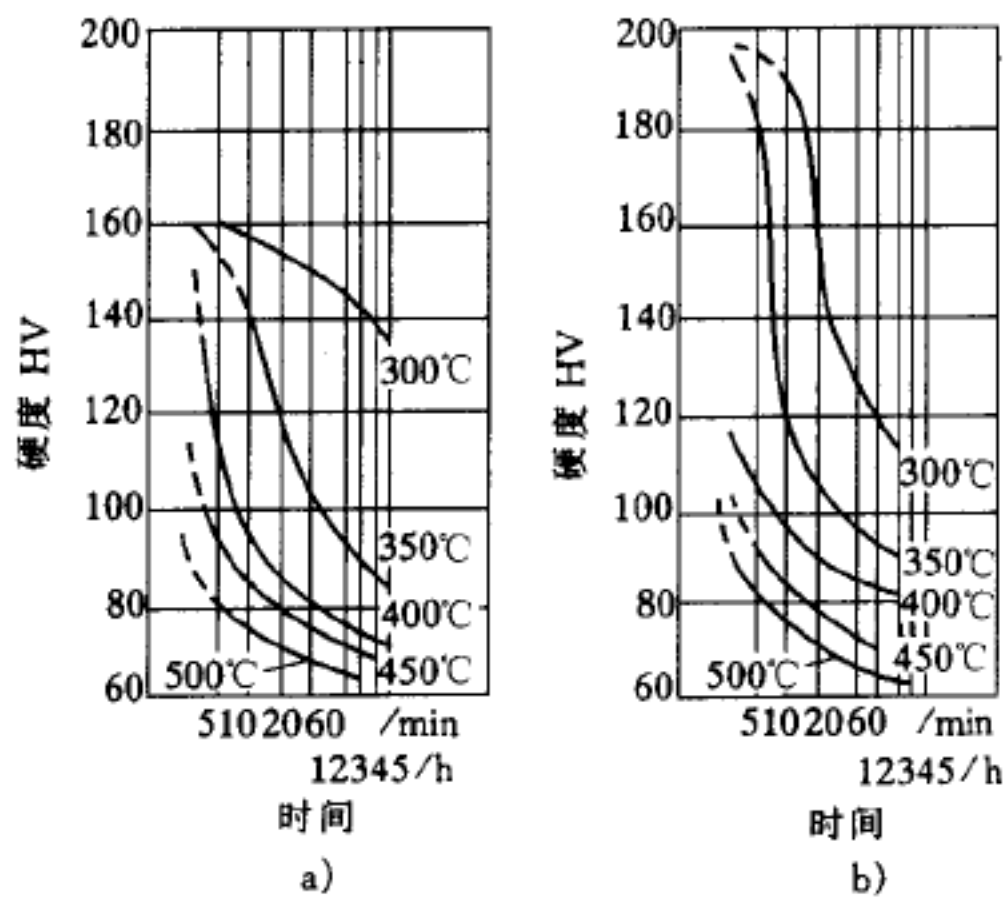


图 9-7 退火温度与时间对黄铜(H68)硬度的影响
a) 变形量 30% b) 变形量 50%

表 9-12 铍青铜的固溶处理温度及时效温度

合 金	固溶处理温度/℃	时效温度/℃
Cu + Be1.9 ~ 2.2 + Ni0.2 ~ 0.5	780 ~ 790	320 ~ 330
Cu + Be2.0 ~ 2.3 + (Ni < 0.4)	780 ~ 800	300 ~ 345
Cu + Be1.6 ~ 1.85 + Ni0.2 ~ 0.4 + Ti0.10 ~ 0.25	780 ~ 800	320 ~ 330
Cu + Be1.85 ~ 2.1 + Ni0.2 ~ 0.4 + Ti0.10 ~ 0.25	780 ~ 800	320 ~ 330
Cu + Be1.9 ~ 2.15 + Co0.25 ~ 0.35	785 ~ 790	305 ~ 325
Cu + Be1.6 ~ 1.8 + Co0.25 ~ 0.35	785 ~ 790	305 ~ 325
Cu + Be0.45 ~ 0.6 + Co2.35 ~ 2.60	920 ~ 930	450 ~ 480
Cu + Be0.25 ~ 0.50 + Co1.4 ~ 1.7 + Ag0.9 ~ 1.1	925 ~ 930	450 ~ 480
Cu + Be0.2 ~ 0.3 + Ni1.4 ~ 1.6	950 ~ 960	450 ~ 500
Cu + Be0.63 + Ti2.48	780 ~ 800	400 ~ 450
Cu + Be2 ~ 2.3 + Co0.35 ~ 0.45 + Fe0.07 ~ 0.11	800 ~ 820	295 ~ 315

注：合金的组成为质量百分数。

表 9-13 固溶处理后铍青铜材料的晶粒尺寸要求

材料厚度/mm	最大平均晶粒直径/mm
大于 0.25 至 0.76	≤0.035
大于 0.76 至 2.29	≤0.045
大于 2.29 至 4.78	≤0.060

表 9-14 铍青铜薄板、带材及厚度很小的工件固溶处理时的保温时间

材料厚度/mm	保温时间/min
< 0.13	2 ~ 6
0.11 ~ 0.25	3 ~ 9
0.25 ~ 0.76	6 ~ 10
0.74 ~ 2.30	10 ~ 30

表 9-15 固溶处理温度(保温时间为 25min)对 0.85mm 厚 QBe1.9 板材晶粒尺寸和力学性能的影响(未时效)

固溶处理温度/℃	晶粒直径/mm	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率(%)
740	0.008 ~ 0.012	510	53
760	0.012 ~ 0.018	500	54
780	0.016 ~ 0.025	490	59

(续)

固溶处理温度/℃	晶粒直径/mm	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率(%)
800	0.025 ~ 0.035	490	56
820	0.035 ~ 0.045	490	50
840	0.045 ~ 0.055	485	40

表 9-16 固溶处理制度对 QBe2 及 QBe1.9 时效后力学性能的影响

材 料	固 溶 处 理			320℃、2 小时时效后的力学性能		
	温度/℃	时间/min	晶粒度/mm	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ (%)	硬度 HV 0.2
QBe2 (0.33mm 厚)	760	5	0.015 ~ 0.020	1165	10.5	360
	780	15	0.025 ~ 0.030	1220	9.5	380
	800	10	0.035 ~ 0.040	1250	7.5	400
	820	15	0.040 ~ 0.045	1260	6.0	405
	840	120	0.055 ~ 0.065	1210	4.0	380
QBe1.9 (0.85mm 厚)	740	25	0.008 ~ 0.012	1220	11.5	355
	760	25	0.012 ~ 0.018	1280	9.5	370
	780	25	0.016 ~ 0.025	1310	9.0	380
	800	25	0.025 ~ 0.035	1310	8.0	395
	820	25	0.035 ~ 0.045	1280	7.0	388
	840	25	0.045 ~ 0.055	1265	6.0	380

表 9-17 时效温度对 QBe2^① 力学性能的影响

时效温度 /℃	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ (%)	硬 度 HV 0.2
300	1205	11.5	360
310	1250	9.0	380
320	1255	8.5	380
330	1200	8.5	355
340	1135	8.0	330

① 试样厚度为 0.3mm, 780℃ 固溶 25min 水淬, 时效 2h。

表 9-18 时效时间对 QBe2 力学性能的影响

处 理 制 度	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ (%)	硬度 HV 0.2
780℃ 25min 水淬 + 320℃ 1h	1225	10.0	375
780℃ 25min 水淬 + 320℃ 2h	1245	9.0	380
780℃ 25min 水淬 + 320℃ 3h	1240	9.0	380
780℃ 25min 水淬 + 320℃ 4h	1240	9.0	380
780℃ 25min 水淬 + 320℃ 5h	1200	8.0	365
780℃ 25min 水淬 + 320℃ 6h	1190	7.0	355

表 9-19 变形度及热处理对 QBe2 及 QBe1.9 条材力学性能的影响

状 态	冷变形度(%)	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ (%)	硬度 HV 0.2
硬 态	10	≈ 570	≈ 27.0	—
	20	660 ~ 650	23.0 ~ 17.0	200
	30	775 ~ 705	8.0 ~ 10.5	230
	40	835 ~ 785	4.5 ~ 4.0	245
	50	885 ~ 860	3.5 ~ 3.5	250
	60	925 ~ 885	3.0 ~ 3.0	265
	70	970 ~ 925	2.5 ~ 2.5	275
硬态 + 固溶处理(780℃, 25min, 水淬)	10	≈ 470	≈ 56.0	—
	20	500 ~ 480	59.5 ~ 56.0	110
	30	505 ~ 475	58.0 ~ 56.0	105

(续)

状 态	冷变形度 (%)	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ (%)	硬度 HV 0.2
硬态 + 固溶处理 (780℃, 25min, 水淬)	40	500 ~ 475	58.5 ~ 56.0	105
	50	495 ~ 475	58.0 ~ 56.0	105
	60	500 ~ 480	59.5 ~ 55.5	105
	70	500 ~ 480	61.5 ~ 56.0	105
硬态 + 固溶处理 (780℃: 25min 水淬) + 时效 (320℃, 2h 空冷)	10	≈ 1295	≈ 9.5	≈ 430
	20	1255 ~ 1285	9.0 ~ 8.5	380 ~ 430
	30	1255 ~ 1295	9.0 ~ 9.0	380 ~ 430
	40	1250 ~ 1280	9.5 ~ 9.5	385 ~ 430
	50	1245 ~ 1300	10.5 ~ 9.5	385 ~ 430
	60	1250 ~ 1295	9.5 ~ 9.0	385 ~ 430
	70	1250 ~ 1315	9.0 ~ 8.5	385 ~ 435
硬态 + 时效 (320℃, 2h, 空冷)	10	≈ 1350	≈ 5.5	≈ 430
	20	1275 ~ 1390	7.0 ~ 4.5	380 ~ 445
	30	1310 ~ 1425	6.0 ~ 3.5	385 ~ 450
	40	1340 ~ 1445	4.0 ~ 3.0	395 ~ 460
	50	1320 ~ 1465	4.0 ~ 2.5	410 ~ 445
	60	1275 ~ 1460	5.0 ~ 2.5	400 ~ 460
	70	1240 ~ 1445	5.0 ~ 2.5	380 ~ 450

注: 条材厚度 0.3mm, 表中数据分子为 QBe2, 分母为 QBe1.9。

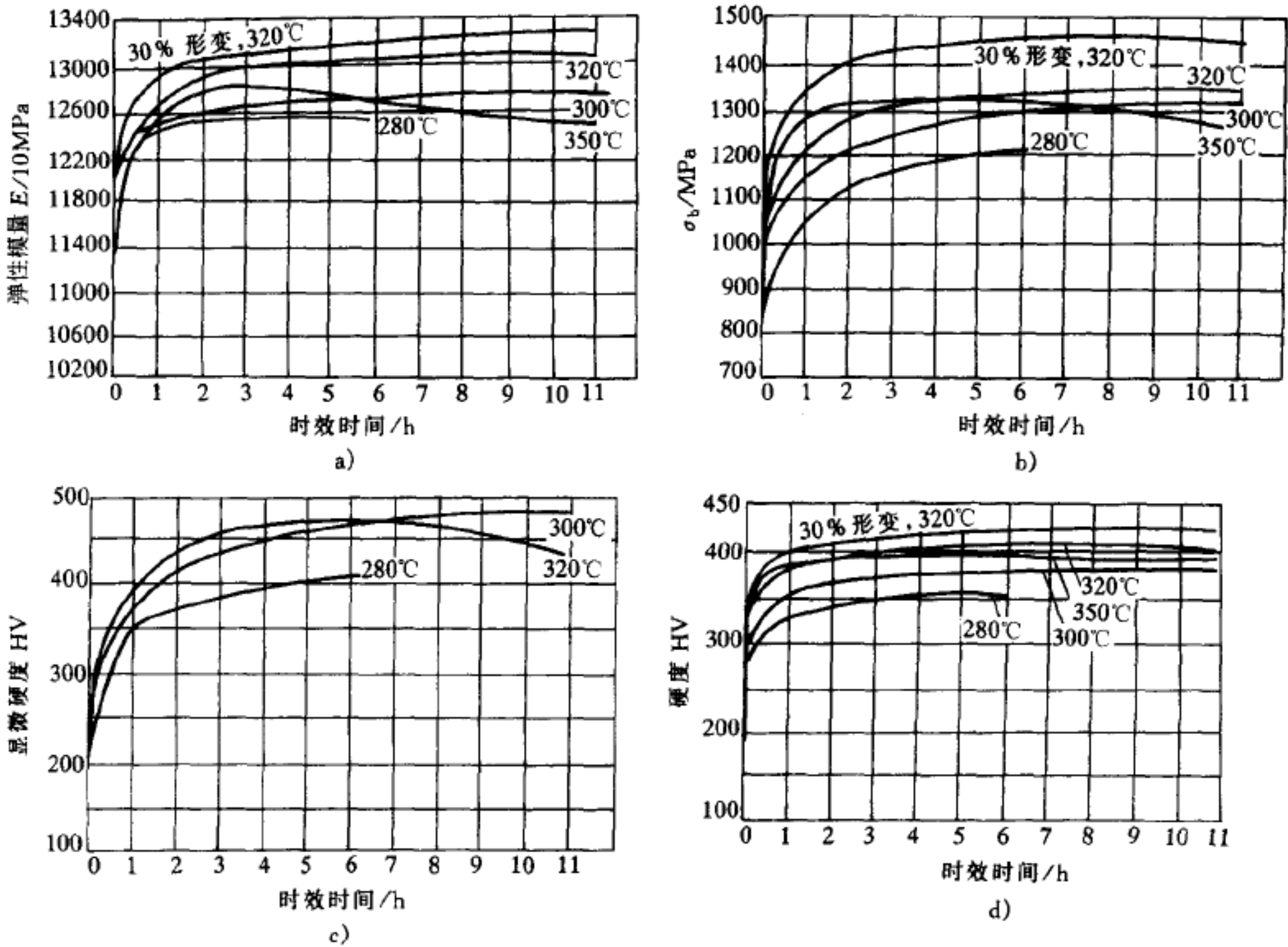


图 9-8 QBe1.9 合金固溶处理(800℃ 15min 水淬)后在不同温度下时效硬化曲线

表 9-20 铍青铜硬态时效后的弹性后效特征值

材 料	QBe1.9			QBe2.0		
时 效 规 程	320℃ 2h	350℃ 30min	280℃ 20h	320℃ 2h	350℃ 20min	280℃ 20h
弹性后效 $\frac{\Delta\epsilon_{10}}{\epsilon}$ (%)	0.152	0.092	0.128	0.356	0.224	0.226
α (%)	0.278	0.361	0.463	0.181	0.266	0.422
特性值 σ /MPa	537	560	550	522	468	530

注:1. 表中数值为 2~3 个试样的平均值。

2. $\frac{\Delta\epsilon_{10}}{\epsilon}$ 表示 10min 正弹性后效变形值。

3. α 表示弹性后效过程的可逆性, $\alpha = \frac{\Delta\epsilon_{60}}{\Delta\epsilon_{120}}$, 其中 $\Delta\epsilon_{60}$ 为 60min 反后效变形值, $\Delta\epsilon_{120}$ 为 120min 正后效变形值。

4. σ 为弯曲应力。

表 9-21 四种铸造铍青铜时效温度与性能

化学成分(质量分数) (%)	时效处理 温度/℃	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ (%)
Cu-Be0.5-Co2.5	480, 3h	720	10
Cu-Be0.4-Ni1.8	480, 3h	720	9
Cu-Be1.7-Co0.3	345, 3h	1120	2.5
Cu-Be2.0-Co0.5	345, 3h	1160	2

表 9-22 白铜均匀化退火规范

牌 号	均 匀 化 退 火	
	温度/℃	时间/h
普通白铜	1000~1050	3~4
锰白铜	830~870	2~3
	1050~1150	3~4
锌白铜	940~970	2~3

表 9-23 白铜中间退火温度

牌 号	退 火 温 度 /℃			
	$\delta > 5\text{mm}$	$\delta = 1 \sim 5\text{mm}$	$\delta = 0.5 \sim 1\text{mm}$	$\delta < 0.5\text{mm}$
B19, B25	750~780	700~750	620~700	530~620
BZn15—20, BMn3—12	700~750	680~730	600~700	520~600
BA16—1.5 BA113—3	700~750	700~730	580~700	550~600
BMn40—1.5	800~850	750~800	600~750	550~600

表 9-24 白铜棒材及线材成品退火温度

牌 号	规 格	退 火 温 度 /℃	
		半 硬	软
BZn15—20	棒 材		650~700
	$\phi 0.3 \sim 6.0\text{mm}$	400~420	600~620
BMn3—12	$\phi 0.3 \sim 6.0\text{mm}$		500~540
BMn40—1.5	$\phi 0.3 \sim 0.8\text{mm}$		670~680
	$\phi 0.85 \sim 2.0\text{mm}$		690~700
	$\phi 2.1 \sim 6.0\text{mm}$		710~730

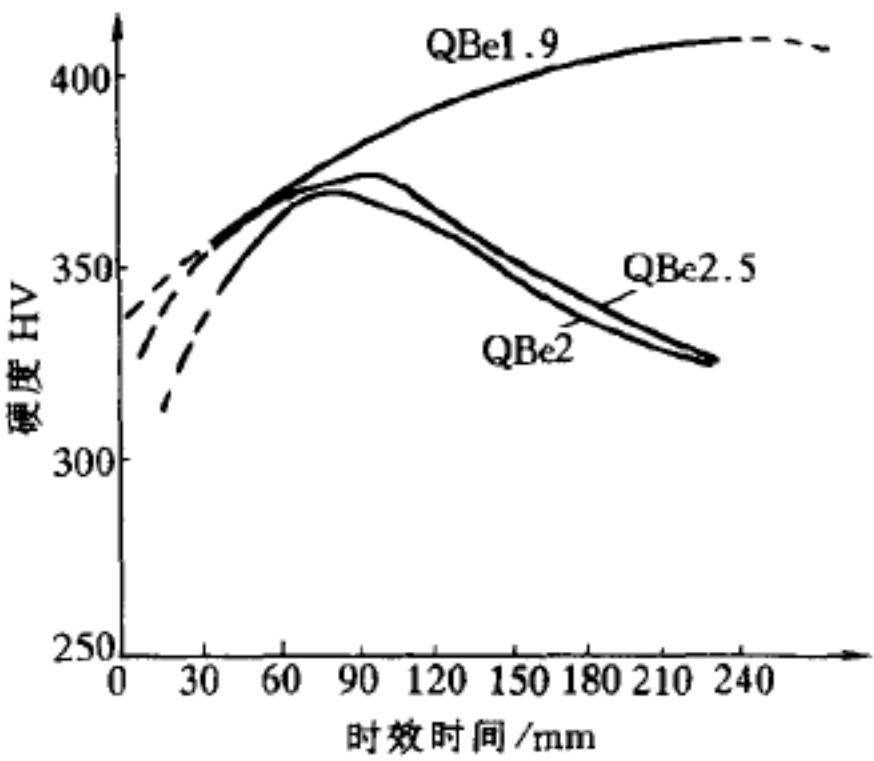


图 9-9 QBe1.9、QBe2.0 及 QBe2.5 在 320℃ 时效的硬化曲线

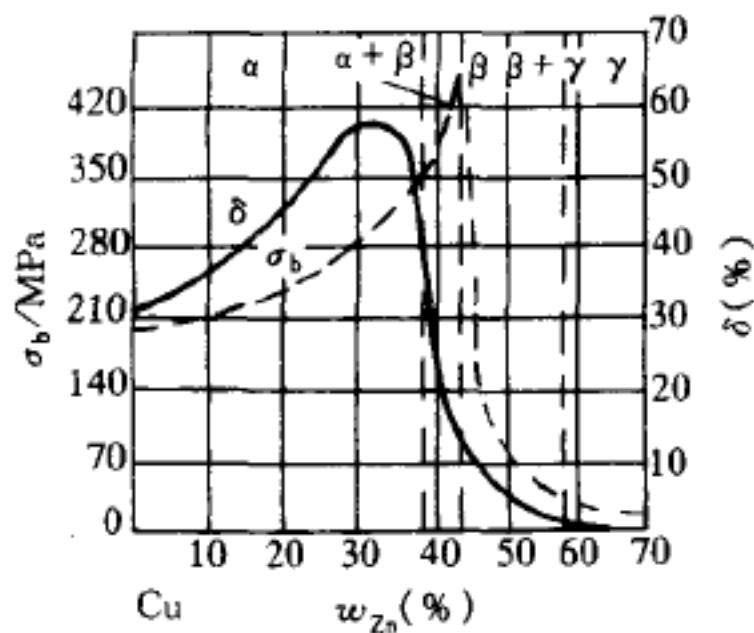


图 9-10 铜锌合金(铸造)力学性能

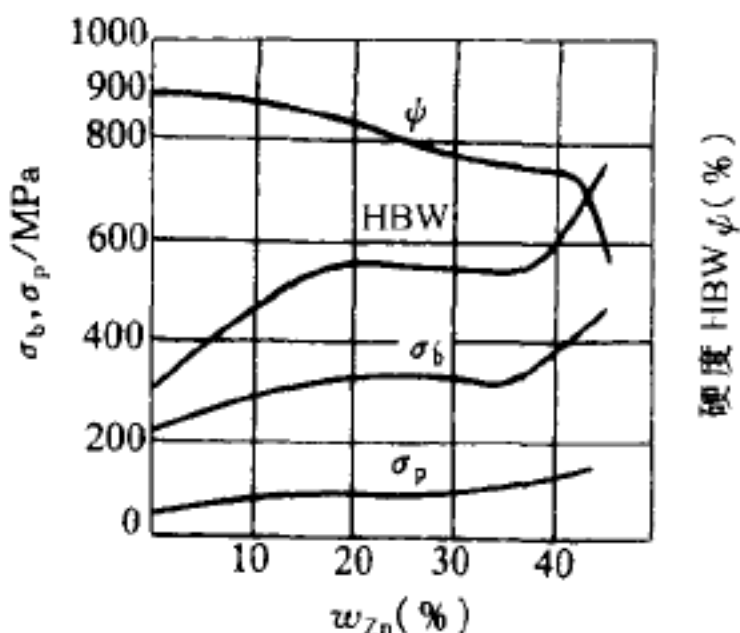


图 9-11 铜锌合金(变形)力学性能

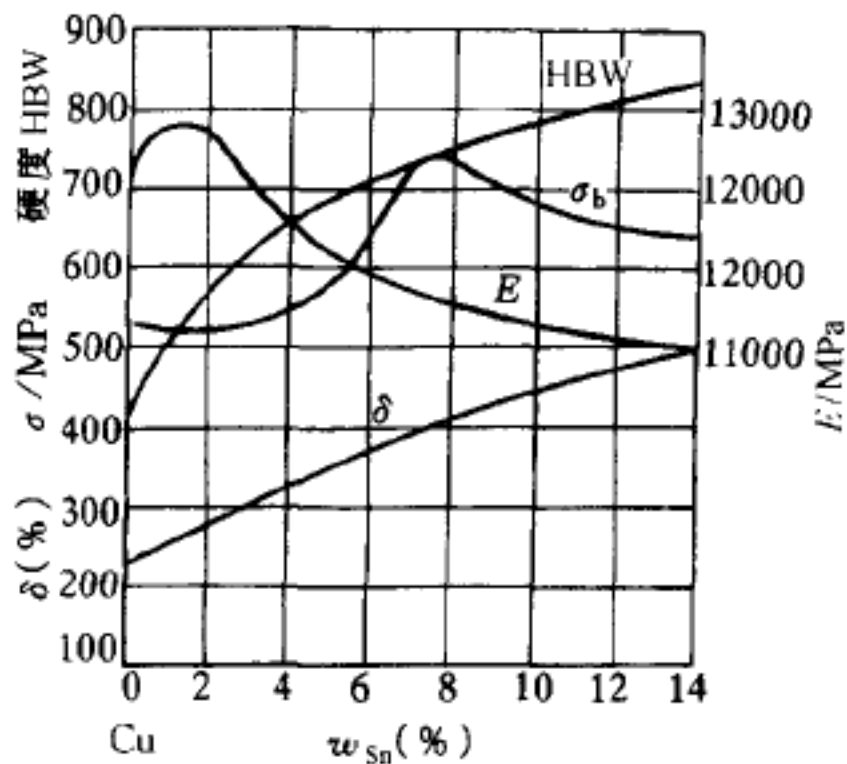


图 9-12 变形和退火的铜锡合金力学性能

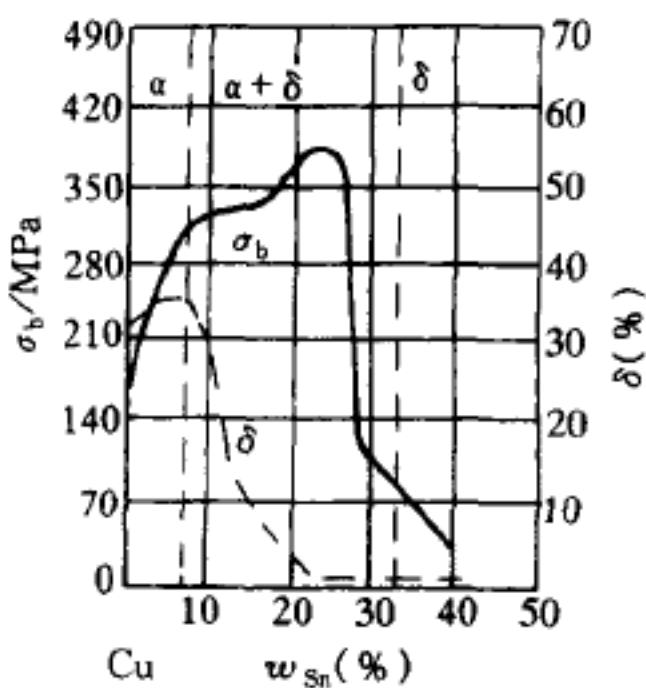


图 9-13 铸造铜锡合金力学性能

铜锌合金加入适量其他元素,不出现新相,相当于变更锌含量。复杂黄铜的组织,可根据加入元素的锌当量系数(表 9-25)来推断。

表 9-25 锌当量系数

合金元素	Mn	Fe	Pb	Sn	Al	Ni	Si	Mg	Cd
锌当量系数	0.5	0.9	1.0	2.0	6.0	-1.3	10.0	2.0	1.0

其计算公式为:

$$X = \frac{A + \sum C_i K_i}{A + B + \sum C_i K_i} \times 100\%$$

式中 X——估算的合金锌含量;
A、B——分别为合金中锌和铜的实际含量(%);
 $\sum C_i K_i$ ——除锌外合金元素实际含量(C)与该元素“锌当量系数”(K)的乘积之总和(%)。

表 9-26 青铜(w_Sn 10%)的力学性能

铸造方法	σ_b /MPa	δ (%)	HBW
干砂型	190 ~ 240	3.5 ~ 8.0	85 ~ 95
湿砂型	220 ~ 270	3.5 ~ 10	90 ~ 110
金属型	230 ~ 320	5.0 ~ 10	90 ~ 125

表 9-27 纯铜物理性能

性 能	数 值
熔点/℃	1083
密度 ρ (20℃)/g·cm ⁻³	8.87 ~ 8.91
比热容 c (20℃)/×4.2J·(g·℃) ⁻¹	0.092
热导率 λ (20℃)/×418.68W·(m·℃) ⁻¹	0.92
线胀系数 α (20 ~ 100℃)/×10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹	16.5
电阻率 ρ (20℃)/×10 ⁻² Ω·mm ² ·m ⁻¹	1.724
电阻温度系数(20℃)/×10 ⁻³ ·℃ ⁻¹	4.28

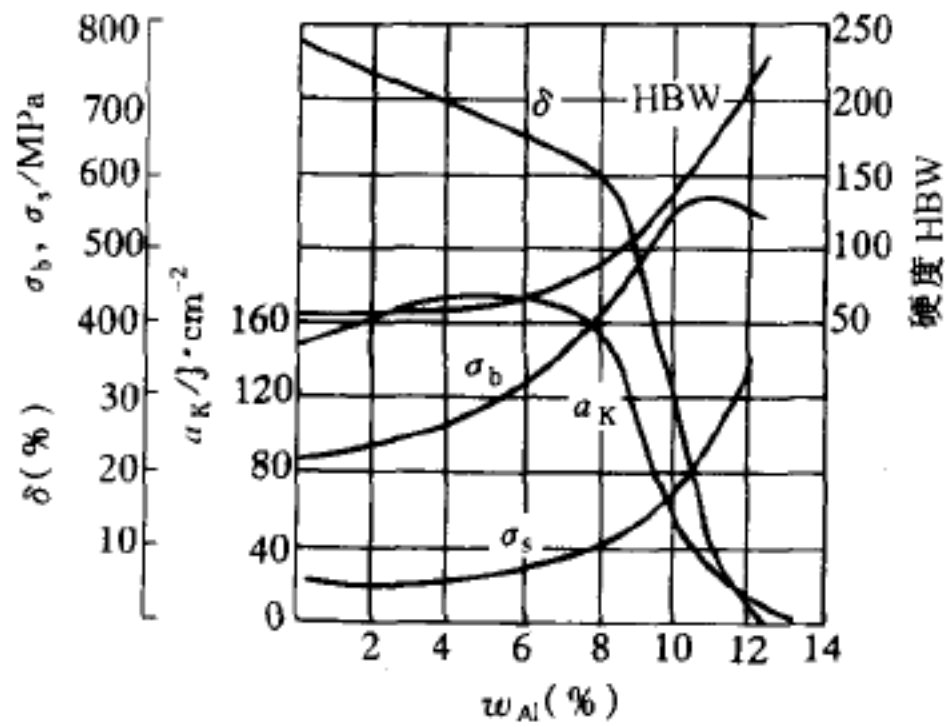


图 9-14 铜铝合金(铸造)力学性能

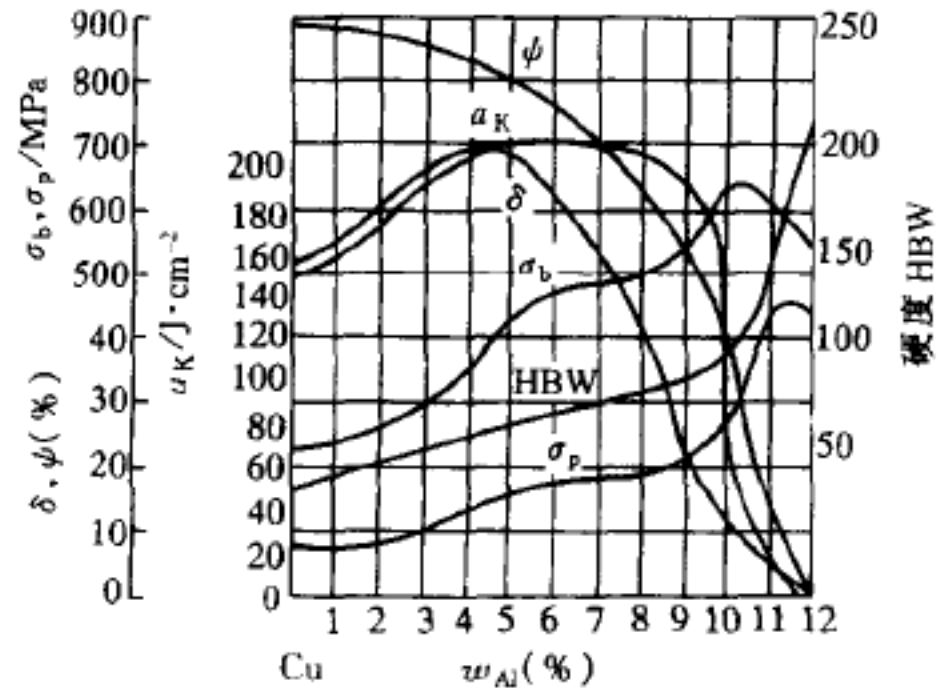


图 9-15 铜铝合金力学性能

材料: 变形 40% 带材 650℃ 退火, 30min

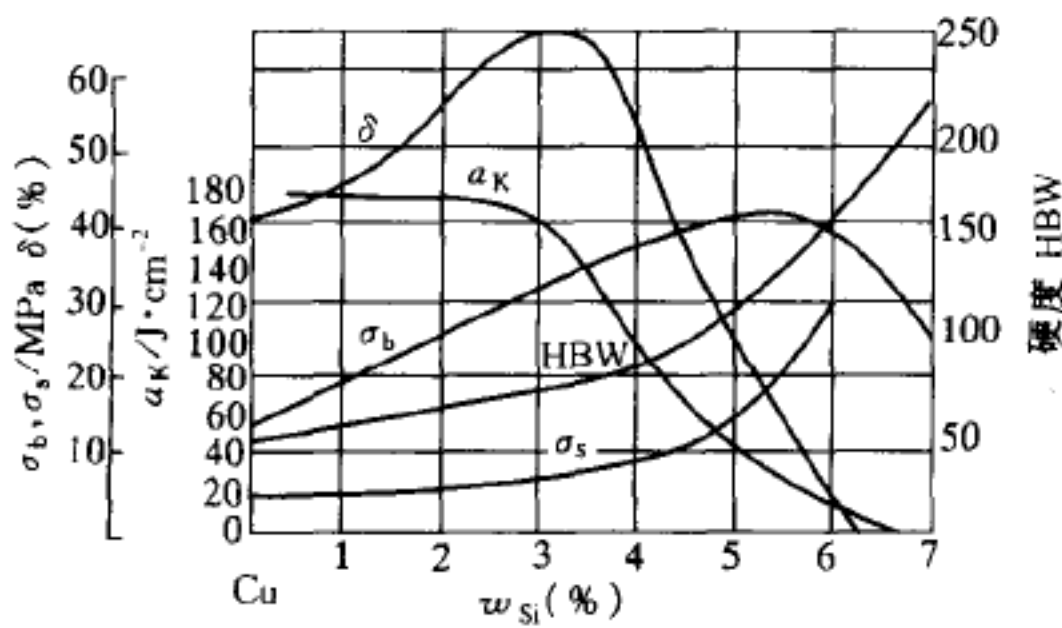


图 9-16 铜硅合金力学性能

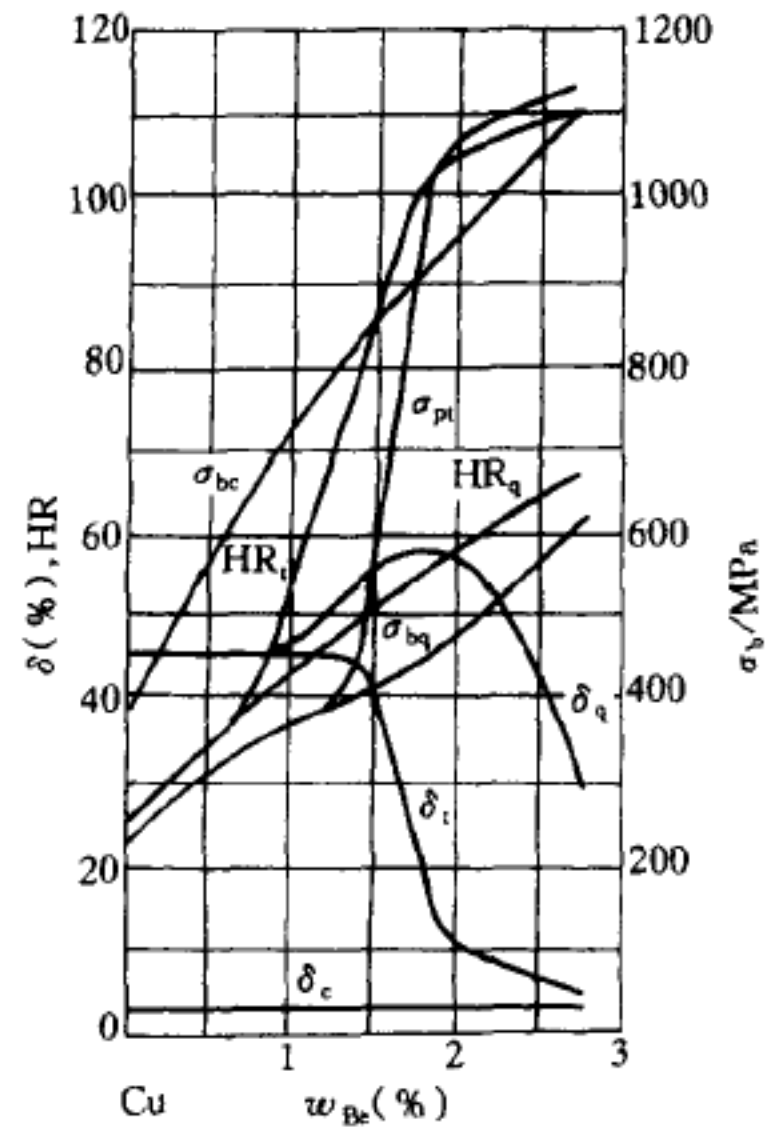


图 9-17 铜镍合金力学性能

q—780℃ 淬火 t—淬火后 300℃ 时效

c—淬火后冷变形 50%

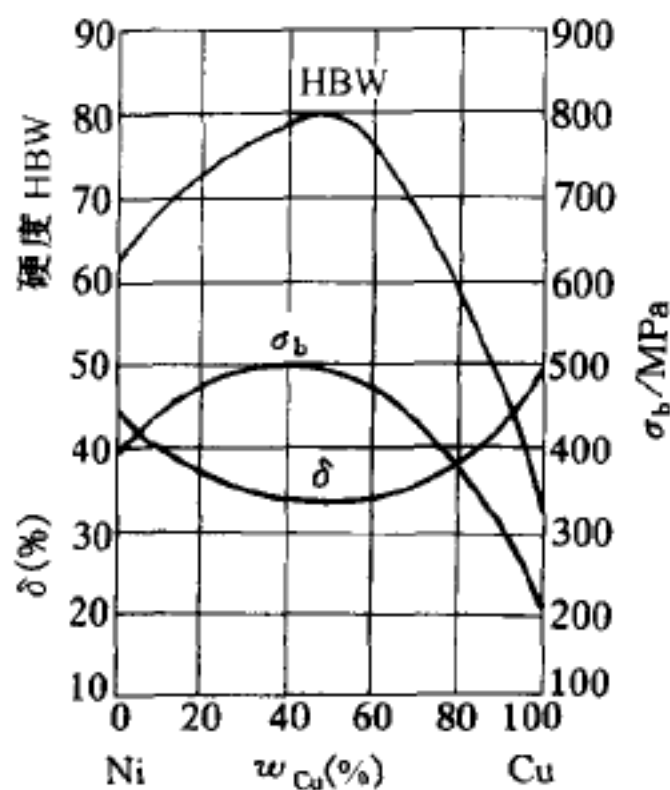


图 9-18 铜镍合金力学性能

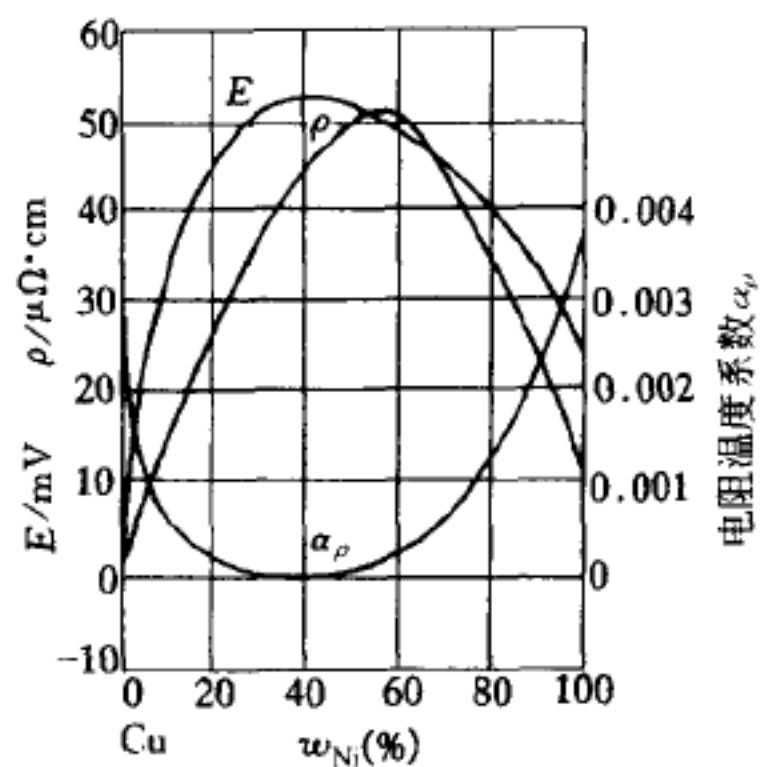


图 9-19 铜镍合金的物理性能

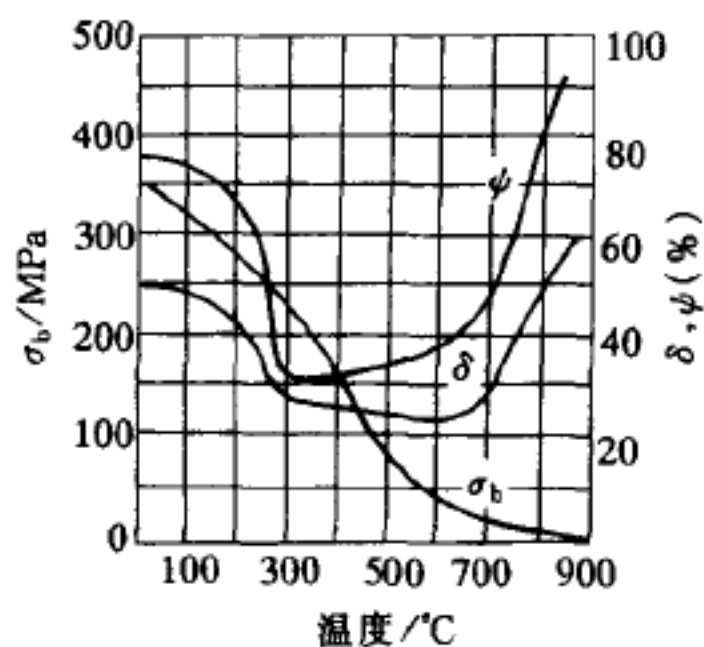


图 9-20 H62 高温力学性能

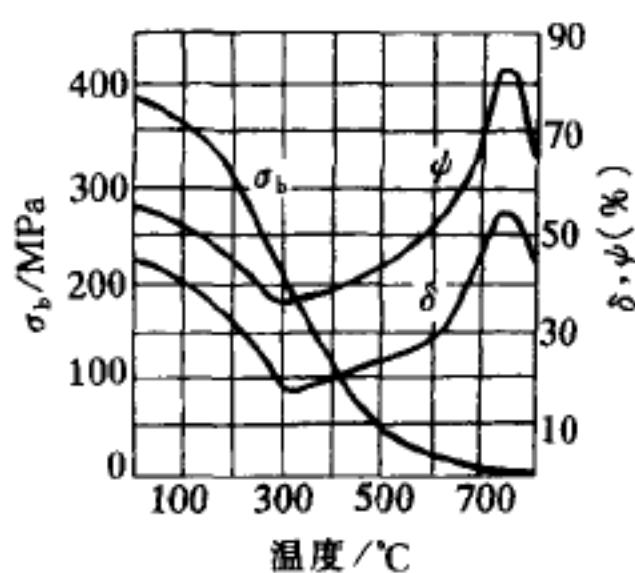
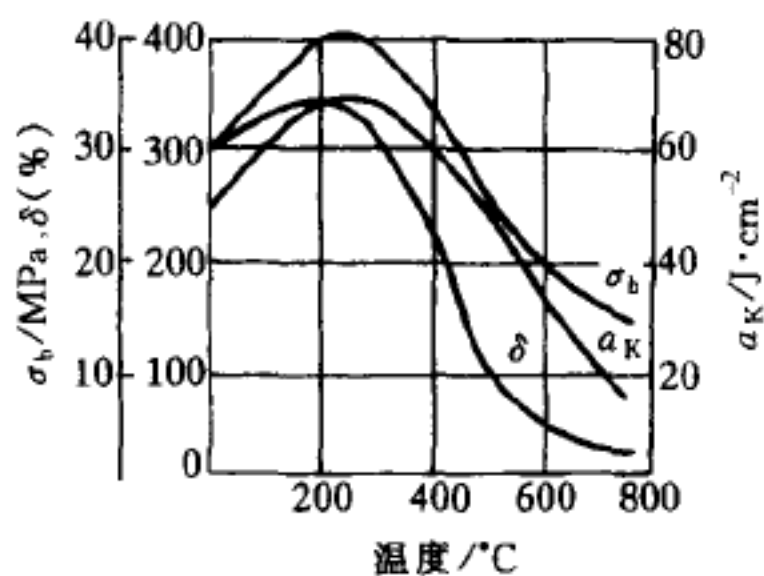
图 9-22 HPb59-1 黄铜高温力学性能
材料: 3mm 条材 600°C 退火 1h

图 9-24 QSn6.5-0.4 高温力学性能

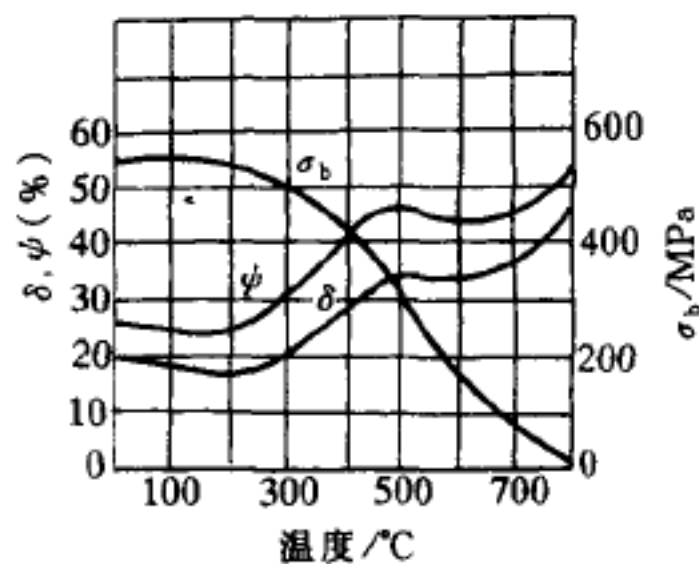


图 9-26 QAl9-4 高温力学性能

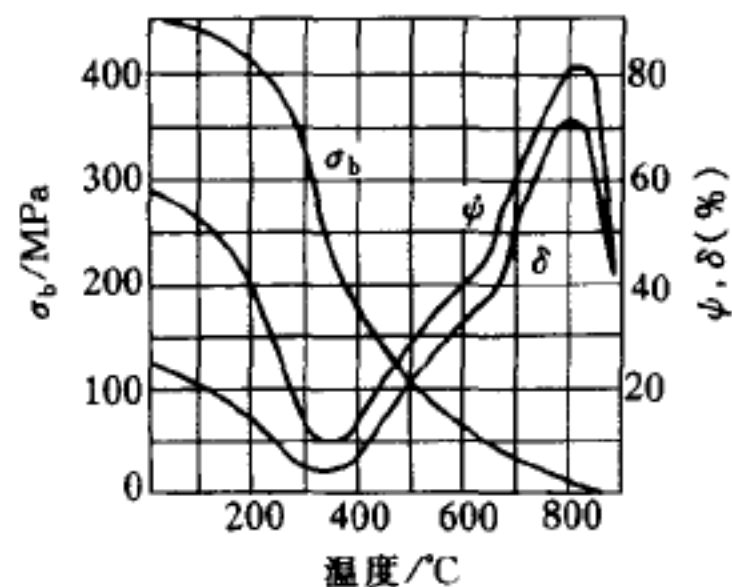
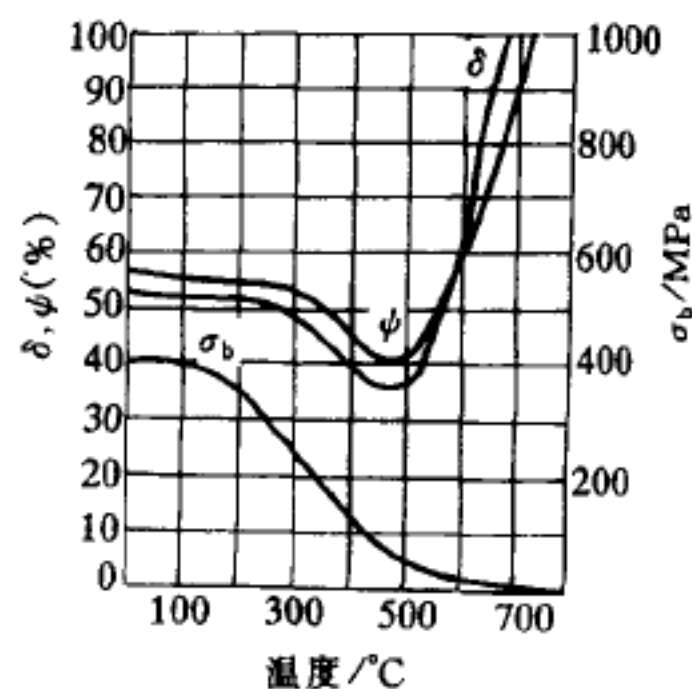
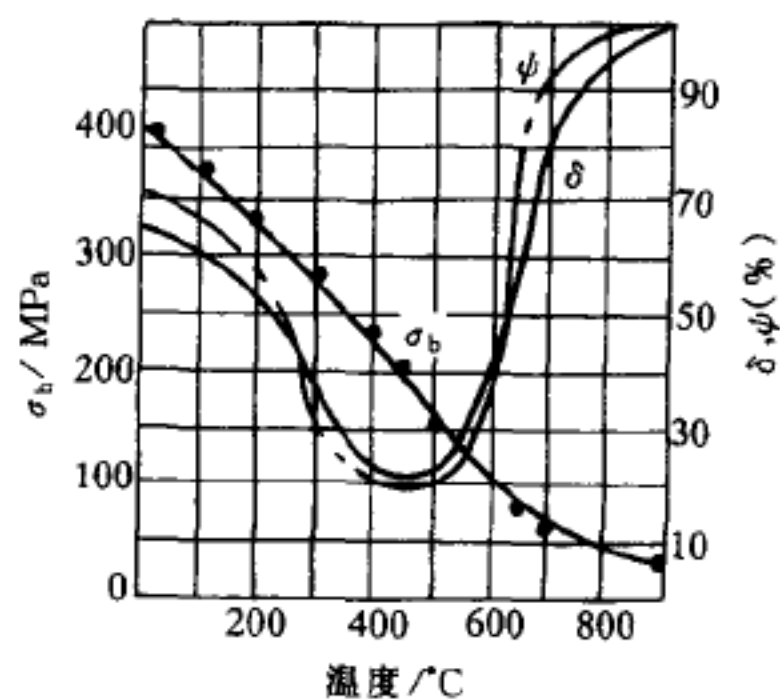
图 9-21 H68 高温力学性能
原材料: 变形 20% 的棒材图 9-23 HFe59-1-1 黄铜高温力学性能
材料: 3mm 条材 600°C 退火 1h

图 9-25 QAl5 高温力学性能

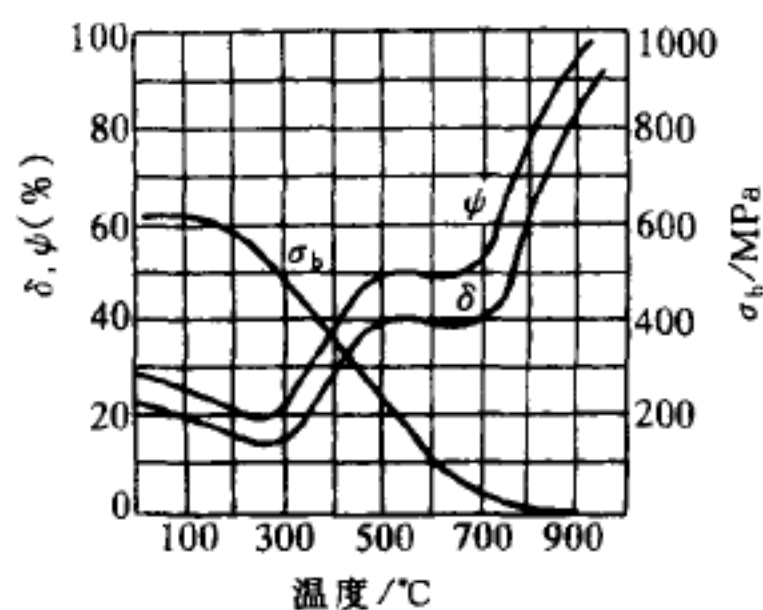


图 9-27 QAl10-3-1.5 高温力学性能

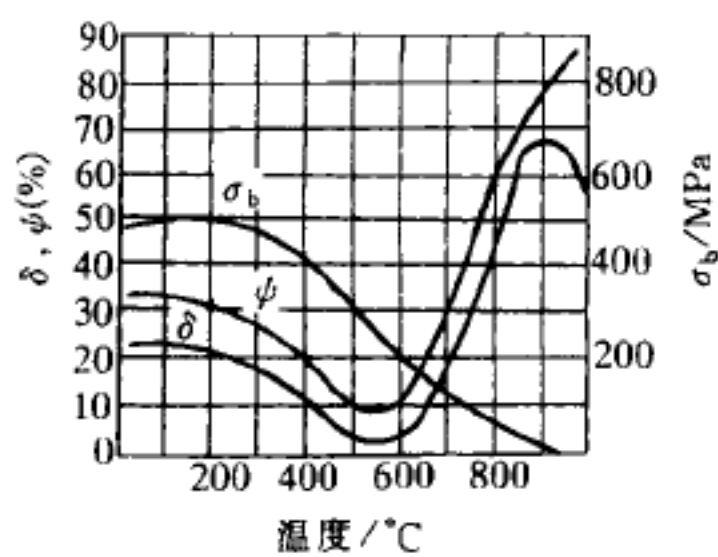


图 9-28 QSi1-3 高温力学性能

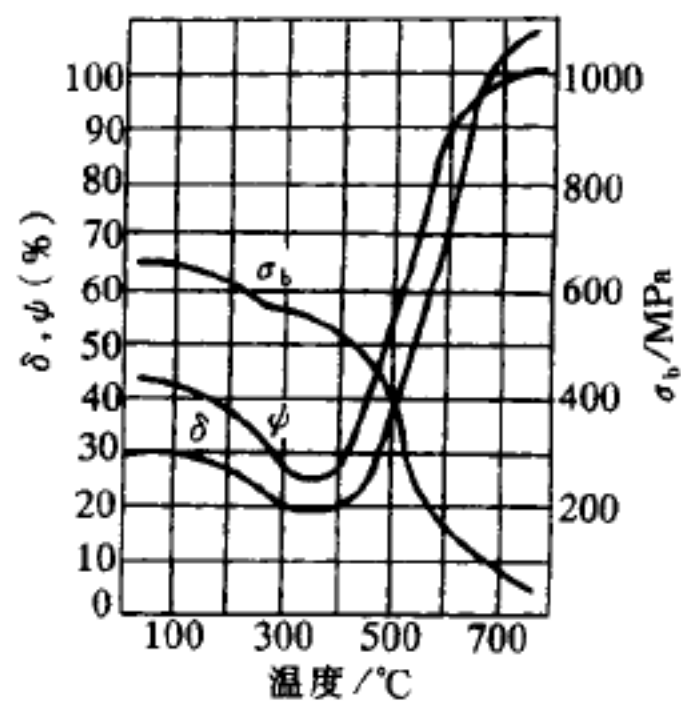


图 9-29 QBe2 高温力学性能

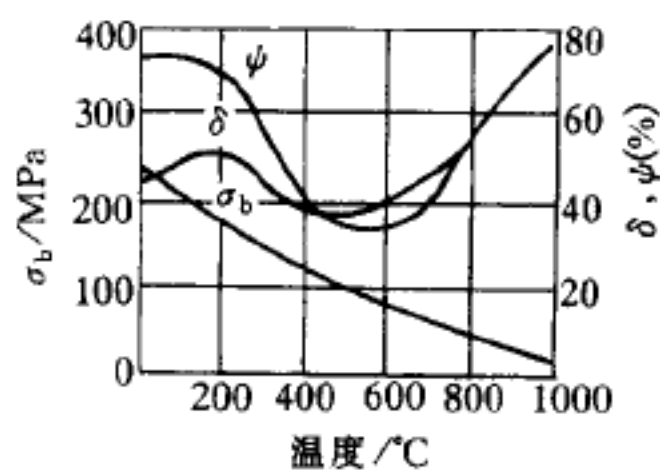


图 9-30 B5 高温力学性能

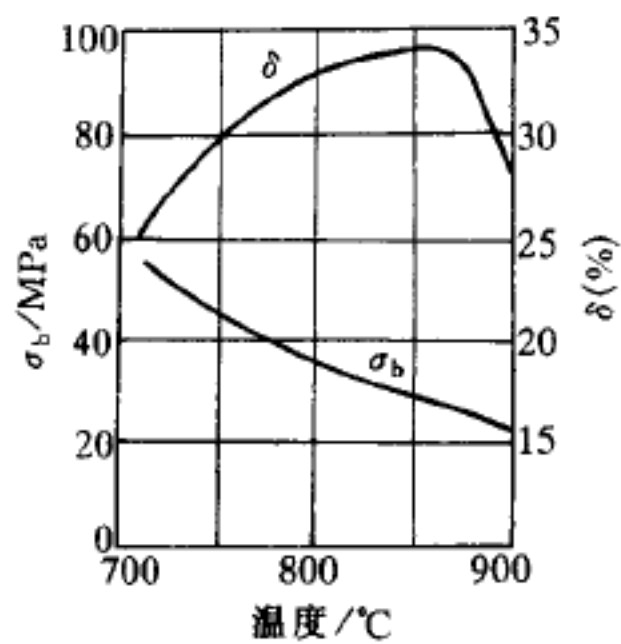


图 9-31 BZn15-20 高温力学性能

表 9-28 变形简单黄铜物理性能

代 号	密 度 ρ $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	比热容 c $/\times 4.2\text{J}\cdot(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$	热导率 λ (20℃) $/\times 418.68\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	线胀系数 α (25~300℃) $/\times 10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	电阻率 ρ (20℃) $/\Omega\cdot\text{mm}^2\cdot\text{m}^{-1}$	电阻温度系数 (20~100℃) $/^{\circ}\text{C}^{-1}$
H96	8.85	0.093	0.58	18.1	0.031	0.0027
H90	8.80	0.09	0.40	18.2	0.039	0.0018
H85	8.75	0.09	0.36	18.7	0.047	0.0016
H80	8.65	0.09	0.34	19.1	0.054	0.0015
H75	8.63	—	0.29	19.6	0.057	—
H70	8.53	0.09	0.29	19.9	0.062	0.00148
H68	8.50	—	0.28	19.9	0.068	0.0015
H62	8.43	—	0.26	20.6	0.071	0.0017
H59	8.40	—	0.18	21.0	0.062	0.0025

表 9-29 变形复杂黄铜物理性能

组 别	合金代号	密 度 $\rho(20^{\circ}\text{C})$ $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	线胀系数 $\alpha(20^{\circ}\text{C})$ $/\times 10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	热导率 λ (20℃) $/\times 418.68\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	电阻率 ρ (20℃) $/\Omega\cdot\text{mm}^2\cdot\text{m}^{-1}$
铅黄铜	HPb74—3	8.70	17.5	0.29	0.078
	HPb64—2	8.50	20.3	0.28	0.066
	HPb63—3	8.50	20.5	0.28	0.066
	HPb60—1	8.50	20.8	0.25	0.064
	HPb59—1	8.50	20.6	0.25	0.065
	HPb59—1A	8.50	20.6	0.25	0.065

(续)

组别	合金代号	密度 $\rho(20^{\circ}\text{C})$ $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	线胀系数 $\alpha(20^{\circ}\text{C})$ $/\times 10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	热导率 λ (20°C) $/\times 418.68\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	电阻率 ρ (20°C) $/\Omega\cdot\text{mm}^2\cdot\text{m}^{-1}$
锡黄铜	HSn90—1	8.80	18.4	0.30	0.054
	HSn70—1	8.58	19.7	0.22	0.072
	HSn62—1	8.54	19.3	0.26	0.072
	HSn60—1	8.45	21.4	0.24	0.070
铝黄铜	HA177—2	8.60	18.5	0.27	0.075
	HA160—1—1	8.20	21.6	—	—
	HA159—3—2	8.40	19.0	0.20	0.078
锰黄铜	HMn58—2	8.50	21.2	0.168	0.108
铁黄铜	HFe59—1—1	8.50	22.0	0.24	0.093
硅黄铜	HSi80—3	8.60	17.1	0.10	0.200
	HSi65—1.5—3	8.50	—	—	—
镍黄铜	HNi65—5	8.65	18.2	0.14	0.146

表 9-30 青铜物理性能

合金代号	密度 ρ $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	线胀系数 $\alpha(20^{\circ}\text{C})$ $/\times 10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	热导率 λ (20°C) $/\times 418.68\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	电阻率 ρ (20°C) $/\Omega\cdot\text{mm}^2\cdot\text{m}^{-1}$
QSn4—3	8.8	18.0	0.20	0.087
QSn4—4—2.5	9.0	18.2	0.20	0.087
QSn4—4—4	9.0	18.2	0.20	0.087
QSn6.5—0.1	8.8	17.2	0.14	0.128
QSn6.5—0.4	8.8	17.1	0.15 ~ 0.2	0.176
QSn7—0.2	8.8	17.5	0.12	—
QSn4—0.3	8.9	17.6	0.20	0.091
QA15	8.2	18.2	0.25	0.0995
QA17	7.8	17.8	0.19	—
QA19—2	7.6	17.0	0.17	0.11
QA19—4	7.5	16.2	0.14	0.12
QA110—3—1.5	7.5	20.0	0.14	0.189
QA110—4—4	7.5	17.1	0.18	0.193
QA111—6—6	8.1	14.9	0.152	—
QSi3—1	8.4	15.8	0.11	0.15
QSi1—3	8.85	18.0	0.25	0.046
QBe2	8.23	16.6	0.2 ~ 0.25	—
QBe2.15	8.22	16.5 ~ 16.7	0.2 ~ 0.25	—

表 9-31 铸造黄铜物理性能

代 号	液相点 $/^{\circ}\text{C}$	密度 ρ $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	线胀系数 α $/\times 10^{-6}$ $\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	热导率 λ $/\times 418.68\text{W}\cdot$ $(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	电阻率 ρ $/\Omega\cdot\text{mm}^2$ $\cdot\text{m}^{-1}$	比热容 c $/\times 4.2\text{J}\cdot$ $(\text{g}\cdot\text{K})^{-1}$	摩擦系数	
							有润滑	无润滑
ZH62	905	8.43	—	0.26	0.72	0.0925	—	—
ZHSi80—3	890	8.2	18.8 ~ 20.8	0.086	0.28	0.0966	0.01	0.19

(续)

代 号	液相点 /°C	密度 ρ /g·cm ⁻³	线胀系数 α / $\times 10^{-6}$ ·°C ⁻¹	热导率 λ / $\times 418.68\text{W} \cdot$ (m·K) ⁻¹	电阻率 ρ /Ω·mm ² ·m ⁻¹	比热容 c / $\times 4.2\text{J} \cdot$ (g·K) ⁻¹	摩 擦 系 数	
							有润滑	无润滑
ZHSi80—3—3	900	8.5	17.0	0.096	0.2	—	0.006	0.173
ZHPb59—1	900	8.5	20.1	0.26	0.068	—	0.013	0.17
ZHA167—2.5	995	8.5	—	0.27	—	—	—	—
ZHA166—6—3—2	900	8.5	19.8	0.119	—	—	—	—
ZHFe59—1—1	900	8.5	—	0.241	0.093	—	0.012	0.39
ZHMn55—3—1	890	8.5	19.1	0.122	—	0.089	0.036	0.36
ZHMn58—2—2	900	8.5	—	0.17	0.118	—	0.016	0.24
ZHMn58—2	880	8.4	22.2	0.168	0.118	0.090	0.012	0.32

表 9-32 铸造青铜物理性能

组 别	代 号	液相点 /°C	密度 ρ /g·cm ⁻³	线胀系数 α (20°C) / $\times 10^{-6} \cdot$ °C ⁻¹	热导率 λ / $\times 418.68\text{W} \cdot$ (m·K) ⁻¹	电阻率 ρ /Ω·mm ² ·m ⁻¹	摩 擦 系 数	
							有润滑	无润滑
锡青铜	ZQSn3—12—5	998	8.6	17.1	—	0.075	0.01	0.158
	ZQSn3—7—5—1	1022	8.8	20.7	0.150	0.085	0.013	0.16
	ZQSn5—5—5	970	8.7	19.1	0.224	0.08	—	0.16
	ZQSn6—6—3	967	8.8	17.1	0.224	0.09	0.009	0.16
	ZQSn10—1	934	8.76	18.5	0.087	0.213	0.008	0.10
	ZQSn10—2	1015	8.6	18.3	0.132	0.160	0.007	0.18
铅青铜	ZQPb12—8	930	9.1	17.1	—	—	0.005	0.1
	ZQPb17—4—4	920	9.2	—	—	—	0.01	0.16
	ZQPb25—5	890	9.4	18.0	0.14	—	0.004	0.14
	ZQPb30	954	9.4	18.4	0.34	—	0.008	0.18
铝青铜	ZQA19—2	1060	7.6	17.0~20.1	0.17	0.11	0.006	0.18
	ZQA19—4	1040	7.5	18.1	0.14	0.124~0.152	0.004	0.16
	ZQA110—3—1.5	1045	7.5	16	0.14	0.125	0.012	0.21

表 9-33 铜及其合金退火工艺参数

代 号	软化退火温度 /°C	消除应力退火温度 /°C	代 号	软化退火温度 /°C	消除应力退火温度 /°C
工业纯铜	500~700		HSn62—1	550~650	360
H96	540~600		HSn60—1	550~650	290
H90	650~720	200	HA177—2	600~650	320
H85	650~720	180	HA170—1.5	550~580	320
H80	600~700	260	HA159—3—2	600~650	380
H70	520~650	260	HMn58—2	600~650	250
H68	520~650	260	HFe59—1—1	600~650	
H62	600~700	280	HFe58—1—1	500~600	
H59	600~670		HNi65—5	600~650	380
HPb64—2	620~670		QSn4—3	590~610	
HPb63—3	620~650		QSn4—4—2.5	590~610	
HPb61—1	600~650	250	QSn4—4—4	590~610	
HPb59—1	600~650	285	QSn6.5—0.1	600~650	
HSn90—1	650~720	230	QSn6.5—0.4	600~650	
HSn70—1	560~580	320	QSn7—0.2	600~650	

(续)

代 号	软化退火温度 /℃	消除应力退火温度 /℃	代 号	软化退火温度 /℃	消除应力退火温度 /℃
QSn4—0.3	600 ~ 650	290	B5	650 ~ 800	250
QAl5	600 ~ 700		B16	750 ~ 780	
QAl7	650 ~ 750		B19	650 ~ 800	
QAl9—2	650 ~ 750		B30	700 ~ 800	
QAl9—4	700 ~ 750		BFe5—1	650 ~ 750	
QAl10—3—1.5	650 ~ 750		BFe30—1—1	700 ~ 800	
QAl11—6—6	700 ~ 750		BAl6—1.5	600 ~ 700	250
QSi3—1	700 ~ 750		BZn15—20	600 ~ 750	
QMn5	700 ~ 750		BMn3—12	720 ~ 860	
QTi3.5	500 ~ 600		BMn40—1.5	800 ~ 850	
QTi3.5—0.2	500 ~ 600		BMn43—0.5	800 ~ 850	

表 9-34 铜合金淬火及时效工艺参数

代 号	淬 火		时效温度 /℃	代 号	淬 火		时效温度 /℃
	温度/℃	冷却剂			温度/℃	冷却剂	
QBe2	760 ~ 780	水	310 ~ 320	QAl10—4—4	910 ~ 930	水	640 ~ 660
QAl9—2	790 ~ 810	水	390 ~ 410	QSi1—3	790 ~ 810	水	410 ~ 475
QAl9—4	840 ~ 860	水	340 ~ 360	QCr0.5	1000 ~ 1050	水	440 ~ 460
QAl10—3—1.5	830 ~ 860	水	300 ~ 350				

表 9-35 铸造铜合金工艺参数

组 别	代 号	浇注温度 /℃	流 动 性 /cm	线收缩率 (%)	可加工性 (以 HPb63—3 为 100%)
黄 铜	ZH62	980 ~ 1060	65	1.77	—
	ZHSi80—3—3		40	1.6 ~ 1.7	—
	ZHSi80—3	980 ~ 1060	60	1.6 ~ 1.7	—
	ZHPb59—1	1030 ~ 1080	60	2.23	—
	ZHA166—6—3—2	1060 ~ 1080	—	—	—
	ZHA167—2.5	1050 ~ 1100	57	1.25	—
	ZHFe59—1—1	1020 ~ 1100	80	1.7	—
	ZHMn55—3—1	980 ~ 1080	70	1.53	—
	ZHMn58—2—2	980 ~ 1050	83	2.18	—
	ZHMn58—2	1040 ~ 1080	83	1.45	—
青 铜	ZQSn3—12—5	1150 ~ 1170	50 ~ 65	—	80 ~ 90
	ZQSn3—7—5—1	1150 ~ 1200	40 ~ 55	—	80 ~ 90
	ZQSn5—5—5	1160 ~ 1200	40	1.6	90
	ZQSn6—6—3	1160 ~ 1200	40	1.6	90
	ZQSn10—1	1060 ~ 1150	45	1.24 ~ 1.44	—
	ZQSn10—2	1120 ~ 1150	21	1.45 ~ 1.51	50
	ZQPb12—8	1000 ~ 1150	45	1.5	45
	ZQPb17—4—4	1150 ~ 1170	—	—	—
	ZQPb25—5	950 ~ 1050	40	1.5	40
	ZQPb30	1030 ~ 1060	—	—	—
	ZQAl9—2	1100 ~ 1140	48	1.7	20
	ZQAl9—4	1100 ~ 1140	85	2.49	20
	ZQAl10—3—1.5	1100 ~ 1150	70	2.4	—

表 9-36 纯铜加工产品力学性能

产 品 种 类	状态	力学性能(不小于)		产 品 种 类	状态	力学性能(不小于)	
		σ_b/MPa	$\delta(\%)$			σ_b/MPa	$\delta(\%)$
直径 5 ~ 40mm 的拉制棒材	硬的	270	6	带材	硬的	300	3
	软的	200	38		软的	210	30
直径 40 ~ 60mm 的拉制棒材	硬的	250	8	线材(铆钉用)	—	240	15
直径 60 ~ 80mm 的拉制棒材	软的	210	13	拉制管材	硬的	300	—
冷轧板(条)材	硬的	300	3		软的	210	35
	软的	200	30	轧制管材	硬的	250	—
热轧板(条)材	—	200	30	挤制管材	—	190	35

表 9-37 黄铜板、带力学性能

材料状态	代 号	σ_b/MPa			$\delta(l_0 = 11.3 \sqrt{F_0})(\%)$		
		不 小 于					
		热轧板材	冷轧板材	带 材	热轧板材	冷轧板材	带 材
软	H59	300	300	300	25	25	10
	H62	300	300	300	30	40	35
	H65		300	300		40	40
	H68		300	300		40	40
	H80		270	270		50	50
	H90		270	240		35	38
	H96		250	220		35	30
	HPb59—1	380	350	350	18	25	25
	HMn58—2	—	390	390	—	30	30
	HSn62—1	350	—	—	20	—	—
$\frac{1}{2}$ 硬	H62	—	350	380	—	20	20
	H65	—	350	350	—	25	25
	H68	—	350	350	—	25	25
	H90	—	340	—	—	7	—
	HMn58—2	—	450	450	—	25	25
硬	H59	—	420	420	—	5	5
	H62	—	420	420	—	10	10
	H65	—	420	420	—	10	10
	H80	—	—	实测	—	—	实测
	H90	—	450	450	—	5	5
	H96	—	400	400	—	—	—
	H68	—	400	400	—	15	15
	HMn58—2	—	600	600	—	3	3
	HSn62—1	—	400	400	—	5	5
	HPb59—1	—	450	450	—	5	5
特 硬	H62	—	600	600	—	2.5	2.5
	H68	—	—	500	—	—	4

表 9-38 黄铜线力学性能

代 号	线材直径 /mm	σ_b/MPa			$\delta(l_0 = 100\text{mm})(\%)$		
		软	1/2 硬	硬	软	1/2 硬	硬
		不小于			不小于		
H68	0.1 ~ 0.18	380	—	700 ~ 950	20	—	—
	0.2 ~ 0.75	350	400		25	5	—
	0.8 ~ 1.4	320	380	600 ~ 800	30	10	—
	1.5 ~ 6.0	300	350	550 ~ 750	40	15	—

(续)

代 号	线材直径 /mm	σ_b /MPa			$\delta(l_0 = 100\text{mm})(\%)$		
		软	1/2 硬	硬	软	1/2 硬	硬
		不小于			不小于		
H65	0.1 ~ 0.5	350	—	550 ~ 760	20	—	—
	0.53 ~ 1.0	320	420	500 ~ 700	25	5	—
	1.1 ~ 3.0	300	400		30	10	—
	3.2 ~ 6.0	300	380		35	13	—
H62	0.1 ~ 0.18	350	—	750 ~ 950	18	—	—
	0.2 ~ 0.5	350	—	700 ~ 950	20	—	—
	0.55 ~ 1.0	350	450	700 ~ 900	26	5	—
	1.1 ~ 4.8	350	400	600 ~ 800	30	10	—
	5.0 ~ 6.0	320	360	550 ~ 750	34	12	—
HPb59—1	2.0 ~ 4.8	350	400	450 ~ 650	30	—	5
	5.0 ~ 6.0	350	400		30	—	8

表 9-39 简单黄铜低温力学性能

代号和状态	温度 ℃	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ (%)	ψ (%)	HRF	代号和状态	温度 ℃	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ (%)	ψ (%)	HRF
H70 变形后退火	20	358	198	49	77	—	H68 冷变形 40%	20	601	592	6.3	66.5	—
	-10	372	201	49	77	—		-78	648	643	7.8	71.5	—
	-40	383	189	58	77	—		-183	720	712	10.1	66.5	—
	-80	400	192	60	79	—	H59 550℃ 退火 2h	20	384	140	51.3	75.5	95
	-120	429	196	55	78	—		-78	429	158	53.0	74.6	104
	-180	515	189	75	73	—		-183	531	200	55.3	71.0	142
H68 550℃ 退火 2h	20	400	275	50.4	72	—	H59 冷变形 25%	20	558	399	19.8	65.5	160
	-78	429	306	49.8	76.6	—		-78	581	420	21.0	67.7	160
	-183	535	409	50.8	70.7	—		-183	689	561	24.4	64.1	181

表 9-40 简单黄铜高温力学性能

代 号	温度/℃	σ_b /MPa	δ (%)	HBW	$a_K/J \cdot \text{cm}^{-2}$	代 号	温度/℃	σ_b /MPa	δ (%)	HBW	$a_K/J \cdot \text{cm}^{-2}$
H90	100	270	48	53	180	H80	300	280	47	48	135
	200	260	48	50	160		500	270	39	44	50
	300	260	50	48	150	H59	100	360	57	56	70
	500	210	—	46	90		200	320	55	56	66
H80	100	310	52	53	160		300	210	48	43	40
	200	300	51	51	150		500	16	—	23	30

表 9-41 黄铜棒力学性能

代 号	制造方法 和 状 态	棒材直径 /mm	σ_b /MPa	δ_{10} (%)	代 号	制造方法 和 状 态	棒材直径 /mm	σ_b /MPa	δ_{10} (%)
			不 小 于					不 小 于	
H62	拉 制	5 ~ 40	380	15	H62	挤 制	10 ~ 160	300	30
		> 40 ~ 80	340	20					

(续)

代 号	制造方法 和 状 态	棒材直径 /mm	σ_b /MPa	δ_{10} (%)	代 号	制造方法 和 状 态	棒材直径 /mm	σ_b /MPa	δ_{10} (%)
			不 小 于					不 小 于	
H68	拉 制	5 ~ 12	380	15	HSn62—1	挤 制	10 ~ 160	370	20
		> 12 ~ 40	320	25	HFe58—1—1	拉 制	5 ~ 40	450	10
		> 40 ~ 80	300	30		> 40 ~ 80	400	12	
	拉制、软	13 ~ 35	300	45		挤 制	10 ~ 160	300	20
HPb59—1	拉 制	5 ~ 40	400	12	HMn58—2	拉 制	5 ~ 12	450	20
	> 40 ~ 80	380	16	> 12 ~ 40			420	20	
	挤 制	10 ~ 160	370	18			> 40 ~ 80	400	25
HPb63—3	拉制、硬	5 ~ 9.5	520	2			挤 制	10 ~ 160	400
		> 9.5 ~ 14	500	5	HFe59—1—1	拉 制	5 ~ 12	500	15
		> 14 ~ 20	460	8			> 12 ~ 40	450	17
		> 20 ~ 30	420	10		> 40 ~ 80	420	20	
	拉制 1/2 硬	10 ~ 20	360	12		挤 制	10 ~ 160	440	28
		> 20 ~ 60	330	16					
HSn62—1	拉 制	5 ~ 40	400	15	HAl60—1—1	挤 制	10 ~ 160	450	18
		> 40 ~ 80	370	20					

表 9-42 黄铜管力学性能

代 号	制造方法	材料状态	σ_b /MPa	$\delta_{10}(\%)$	代 号	制造方法	材料状态	σ_b /MPa	$\delta_{10}(\%)$
			不 小 于					不 小 于	
H62	挤 制	—	300	38	HSn70—1	拉 制	半 硬 软	530	30
								300	38
	拉 制	半 硬 软	340	30	HSn62—1	拉 制	半 硬 软	340	30
			300	38				300	35
H68	拉 制	半 硬 软	350	30	HPb59—1	挤 制	—	400	20
			300	38	HFe59—1—1	挤 制	—	440	28

表 9-43 铸造青铜力学性能

代 号	铸造 方法 ^①	力 学 性 能			代 号	铸造 方法 ^①	力 学 性 能		
		σ_b /MPa	δ (%)	HBW			σ_b /MPa	δ (%)	HBW
		不 小 于					不 小 于		
ZQSn3—12—5	S	180	8	60	ZQSn7—0.2	S	200	10	70
	J	220	10	60		J	220	15	80
ZQSn3—7—5—1	S	180	8	60	ZQSn10—1	S	220	3	80
	J	220	10	70		J	250	5	90
ZQSn5—5—5	S	180	8	60	ZQSn10—2—1	J	250	5	75
	J	200	10	65					
ZQSn6—6—3	S	180	8	60	ZQSn10—2	S	200	10	70
	J	200	10	65		J	250	6	80

(续)

代 号	铸造 方法 ^①	力 学 性 能			代 号	铸造 方法 ^①	力 学 性 能		
		σ_b/MPa	$\delta(\%)$	HBW			σ_b/MPa	$\delta(\%)$	HBW
		不 小 于					不 小 于		
ZQSn10—5	S	200	10	70	ZQPb12—8	S	150	6	60
	J	250	10	70		J	200	3	65
ZQAl9—2	S	400	20	85	ZQPb17—4—4	S	150	5	55
	J	450	20	95		J	180	7	60
ZQAl9—4	S	400	10	100	ZQPb24—2	J	100	6	35
	J	500	12	110					
ZQAl10—3—1.5	S	450	10	110	ZQPb25—5	S	140	4	45
	J	500	20	120		J	150	6	55
ZQPb10—10	S	150	3	65	ZQPb30	J	—	—	25
	J	200	5	70					

① S—砂型, J—金属型。

表 9-44 锡青铜棒力学性能

代 号	制造方法	棒材直径 /mm	σ_b/MPa	$\delta_{10}(\%)$	HBW
			不 小 于		
QSn6.5—0.1	拉 制	5 ~ 40	420	15	—
QSn6.5—0.4	挤 制	40 ~ 120	350	55	—
QSn7—0.2	拉 制	5 ~ 40	450	15	130 ~ 200
	挤 制	40 ~ 150	360	55	≥ 70
QSn4—3	拉 制	5 ~ 12	440	10	
		> 12 ~ 25	380	15	
		> 25 ~ 35	340	16	
		> 35 ~ 40	320	16	
	挤 制	40 ~ 120	280	25	

表 9-45 锡青铜板、带力学性能

材料状态	代 号	σ_b/MPa		$\delta(l_0 = 11.3 \sqrt{F_0})(\%)$	
		不 小 于			
		板	带	板	带
软	QSn6.5—0.1	300	300	38	38
	QSn6.5—0.4				
	QSn7—0.2				
	QSn4—3	300	300	38	38
QSn4—0.3					
硬	QSn6.5—0.1	500	550	5	8
	QSn6.5—0.4				
	QSn7—0.2				
	QSn4—3	500	550	3	3
QSn4—0.3					
特硬	QSn6.5—0.1	600	680	1	2
	QSn6.5—0.4				
	QSn7—0.2				
	QSn4—3	600	650	1	2
QSn4—0.3					

表 9-46 铝青铜棒力学性能

代 号	制造方法	棒材直径 /mm	σ_b /MPa	$\delta_{10}(\%)$	HBW
			不 小 于		
QA19—2	拉 制	5 ~ 22	550	12	—
		> 22 ~ 40	550	15	—
	挤 制	25 ~ 45	500	15	—
		> 45 ~ 120	480	20	—
QA19—4	挤 制	6 ~ 15	600	10	—
		> 15 ~ 120	550	15	110 ~ 190
		> 120 ~ 160	500	12	110 ~ 190
QA110—3—1.5	挤 制	6 ~ 15	650	8	—
		> 15 ~ 160	600	12	140 ~ 190
QA110—4—4	挤 制	6 ~ 29	700	4	170 ~ 220
		> 29 ~ 160	650	5	170 ~ 220
QA111—6—6	挤 制	6 ~ 28	700	4	—
		> 28 ~ 50	650	5	—

表 9-47 铝青铜管力学性能

代 号	σ_b /MPa	δ_{10} (%)	HBW
	不 小 于		
QA19—2	480	15	—
QA19—4	500	15	110 ~ 190
QA110—3—1.5	600	12	140 ~ 190
QA110—4—4	650	5	170 ~ 220

表 9-48 硅青铜棒力学性能

代 号	制造方法	棒材直径 /mm	σ_b /MPa	δ_{10} (%)
			不 小 于	
QSi3—1	拉制	5 ~ 12	500	10
		> 12 ~ 40	480	15
	挤制	30 ~ 100	350	20
QSi1—3	挤制	20 ~ 80	500	10

表 9-49 铍青铜条、带力学性能

代 号	材料状态	σ_b /MPa	δ ($l_0 = 11.3 \sqrt{F_0}$) (%)	HV	代 号	材料状态	σ_b /MPa	δ ($l_0 = 11.3 \sqrt{F_0}$) (%)	HV
		不 小 于					不 小 于		
QBe2	软 (淬火)	400 ~ 600	30	≤ 130	QBe2	淬火后 时 效	1150	2	≥ 320
QBe1.9				≤ 120	QBe1.9				≥ 350
QBe2	硬 (淬火后 冷轧)	650	2.5	≥ 170	QBe2	冷轧后 时 效	1200	1.5	≥ 360
QBe1.9				≥ 160	QBe1.9				≥ 370
QBe1.7				≥ 150	QBe1.7		1100	2.0	≥ 340

表 9-50 锡青铜铝青铜低温力学性能

合金代号	性 能	试验温度/℃			合金代号	性 能	试验温度/℃		
		17	-196	-253			17	-196	-253
QSn6.5—0.4	σ_b /MPa	630	840	950	QA15	σ_b /MPa	420	580	650
	δ (%)	12	29	29		δ (%)	61	81	83
	ψ (%)	61	54	51		ψ (%)	70	76	72

表 9-51 白铜板、带力学性能

代 号	材料 状态	σ_b /MPa		δ_{10} (%)	
		板	带	板	带
		不 小 于			
B5	软	—	220	—	32
	硬	400	400	10	10
B19	软	300	300	30	25
	硬	400	400	3	3
B30	软	380	380	23	—
	硬	550	550	3	—
BMn3—12	软	360	360	25	25
BMn40—1.5	软	400 ~ 600	400	实测	实测
	硬	600	650	实测	实测
BA16—1.5	硬	550	—	3	—
BZn15—20	软	350	350	35	35
	硬	550	550	2	1.5
	特硬	650	650	1	1

表 9-52 锌白铜(BZn15—20)棒力学性能

制造方法	状 态	棒材直径 /mm	σ_b /MPa	δ_{10} (%)
拉 制	硬	5 ~ 20	450	5
		21 ~ 30	400	7
		31 ~ 40	350	12
挤 制	软	5 ~ 40	300	30
		25 ~ 80	300	30

表 9-53 白铜管力学性能

代 号	材料状态	σ_b /MPa	δ_{10} (%)
不 小 于			
BZn15—20	软	300	30
	半硬	400	15
	硬	500	3
BFe5—1	软	260	30
B30	软	380	23
BFe30—1—1	半硬	500	6

表 9-54 结构用白铜低温力学性能

代 号	状 态	试验温度/℃	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ (%)	ψ (%)
B19	软的	20	361	194	26	78
		-10	394	201	28	77
		-40	418	203	29	77
		-80	432	204	29	76
		-120	464	205	28	75
		-180	516	228	36	72
BZn15—20	硬的	20	517	486	21.5	54.3
		-154	656	564	35.5	62.3
	软的	20	455	207	46.8	62.3
		-154	584	268	56.8	69.5
BA16—1.5	软的	20	261	80	42	80
		-10	348	96	40	80
		-40	391	113	41	80
		-80	402	115	43	79
		-120	432	105	44	82
		-180	471	161	49	82
	900℃ 淬 火, 500℃ 时效 2h	20	638	—	24	50
		-10	701	385	22	48
		-40	726	432	25	57
		-80	706	361	23	57
		-120	755	444	26	63
		-180	750	385	26	67

表 9-55 黄铜^①在各种介质中的腐蚀情况

腐蚀介质	腐蚀情况	腐蚀速度 /mm·a ⁻¹	腐蚀介质	腐蚀情况	腐蚀速度 /mm·a ⁻¹
农村大气	极慢	0.0001 ~ 0.00075	有水的卤素	极易腐蚀不可用	
城市 and 海滨大气	极慢	0.0013 ~ 0.0038	湿度为 70%, 浓度为 1% 的 SO ₂ 气体	产生腐蚀不可用	
低速干燥纯净蒸汽	极慢	< 0.0025	H ₂ S 气体	高锌稳定低锌腐 蚀很快	
高速 (1000m/s) 湿蒸 汽	产生冲刷腐蚀		水中存在碘化物	极易腐蚀不可用	
含氧、CO ₂ 、NH ₃ 的蒸 汽	急剧腐蚀		氧化性溶液 (如 K ₂ Cr ₂ O ₇ 溶液)	极易腐蚀不可用	
常温纯净淡水	轻微	0.0025 ~ 0.025	硝酸	极易腐蚀不可用	
常温海水	比在淡水中腐蚀 略快	0.0075 ~ 0.1	盐酸	极易腐蚀	
矿水, 尤其是含 Fe ₂ (SO ₄) ₃ 的水	极易腐蚀不可用		硫酸	稍慢	
水中存在氟化物	轻微		亚硫酸	轻微	
水中存在氯化物	明显		磷酸溶液	较慢	0.5
苛性钠溶液	慢	0.5	脂肪酸	强烈	0.25 ~ 1.3
含空气或在高温下苛 性钠溶液	强烈	1.8	静置醋酸	慢	0.025 ~ 0.75
含氨溶液	极快	6	苹果汁	不可用	
硅氟氢酸	轻微		啤酒	极慢	
CuCl 和 CuCl ₂	不可用		甲醇、乙醇、乙二醇	轻微	0.005 ~ 0.006
常温干燥和氟、氯、 溴、氟化氢、氯化氢、二 氧化碳、一氧化碳和氮 等气体	实际不起作用		干燥四氯化碳	不腐蚀	
			丙酮、汽油	可用	

① 黄铜包括简单黄铜和复杂黄铜。

表 9-56 复杂黄铜在各种介质中的腐蚀情况

合金	腐蚀介质	腐蚀情况	腐蚀速度 /mm·a ⁻¹	腐 蚀 条 件		
				介质浓度 (%) (质量)	温度/℃	腐蚀时间 /h
HSn72—1	CuSO ₄	可用	—	溶液	—	—
	Na ₂ SiF ₆	—	< 0.005	溶液	—	—
	Na ₂ SO ₃	可用	—	任意	20	—
	CCl ₄	—	0.0045	湿的	20	—
HSn70—1	H ₂ SO ₄	—	0.6 ~ 1.0 (增速)	浓的	20 ~ 40	720
	H ₂ SO ₄	—	0.12 (增速)	0.5	190	100
HSn60—1	H ₂ SO ₄	—	0.36	2	80	500
HA177—2	氧饱和的海水	—	0.25	—	24	3840
HPb56—2	NaHCO ₃	—	< 0.005	—	20	—
HPb59—1	CCl ₄	—	0.00145	湿的	20	—
	H ₃ PO ₄	—	0.04	40	20	—
	H ₃ PO ₄	—	0.02	浓的	20	—
HFe59—1—1	H ₂ SO ₄	—	0.14	0.5	190	100
	H ₂ SO ₄	—	62.8	25	190	100

表 9-57 锡青铜在海水中腐蚀速度

合金牌号	腐蚀速度 /mm·a ⁻¹	合金牌号	腐蚀速度 /mm·a ⁻¹
ZQSn10—2	0.018	QSn4—4—2.5	0.028
ZQSn6—6—3	0.028	QSn6.5—0.4	0.04
QSn4—3	0.022	QSn4—0.3	0.03

表 9-58 铝青铜耐蚀性能

合金牌号	重量损失/g·(m ² ·24h) ⁻¹		
	100℃湿蒸汽	海水	H ₂ SO ₄ 10%
QA15	—	0.55	1.2
QA19—2	2.4	0.25	—
QA19—4	1.45	0.25	0.4
QA110—3—1.5	—	0.25	0.7
QA110—4—4	—	0.18	0.58

表 9-59 各国铜合金牌号对照表

中 国	俄 罗 斯	美 国	英 国	德 国	日 本
GB(YB)	ГОСТ	ASTM	BS	DIN	JIS
T1	M0				
T2	M1				
T3	M2				
T4	M3				EOFCUP
TU1	Mb1	101			OF-CUP
TU2	Mb2	102	C103		
H96	Л96	210			RBS1
H90	Л90	220	CZ101	MS90	RBS2
H80	Л80	240	CZ103	MS80	RBST4
H70	Л70	260	CZ106	MS70	BSP1
H68	Л68	268			
H62		272, 274	CZ108	MS63	BSP2B
QSn4—3	БРОЦ4—3			MSnBZ4	
QSn4—4—4	БРОЦ4—4—4			MSnBZ4Pb	BC6
QSn6.5—0.1	БРОФ6.5—0.15	B139BZ	407—3	SnBZ6	PBB2
QSn6.5—0.4	БРОФ6.5—0.4	B139、B159			
QSn7—0.2	БРОФ7—0.2	519			
QA15	БРА5	B169A			
QA17	БРА7	B169B			
QA19—2	БРАМЦ9—1				AB1
QA110—3—1.5	БРАЖМЦ10—3—1.5				AB5
QA110—4—4	БРАЖН10—4—4	AMS4640	2033	NiAlBZ	
QBe2	БР2	172			BeCu2
QBe1.9	БРБНТ1.9				
QBe1.7	БРБНТ1.7	170			BeCu1
QSi3—1	БРКМЦ3—1	B98—D	1948		
QCd1.0	БРКД1.0				
QCr0.5	БРХ0.5				
B19	МН19	B171	B372—2	CuNi20	
BMn3—12	МНМЦ3—12				
BFe30—1—1	МНЖМБ30—0.8—1	715			
BZn15—20	МНЦ15—20	B206—D	CN106		CNTF3

9.2 铝和铝合金的热处理及性能(表 9-60 ~ 表 9-110,图 9-32 ~ 图 9-50)

表 9-60 纯铝的物理力学性能

性 能	数 值	性 能	数 值
原子序数	13	熔点	660.24℃
原子量	26.9815	沸点	2467℃
点阵常数(面心立方)	0.40495nm	热导率(0~100℃)	22.609W/(m·K)
原子直径	0.286nm	电阻系数(20℃)	2.67μΩ·mm ² /m
密度(25℃)	2.698g/cm ³	线膨胀系数(20~100℃)	23.8×10 ⁻⁶ /K
拉伸强度 σ _b	80~100MPa	硬度 HBW	25~30
条件屈服限 σ _{0.2}	30~50MPa	伸长率 δ	35%~40%

表 9-61 铸造铝合金分类

分类	铝硅合金	铝铜合金	铝镁合金	铝锌合金
代号	ZL101,ZL101A ZL102,ZL104 ZL105,ZL105A,ZL106 ZL107,ZL108 ZL109,ZL110 ZL111,ZL114A ZL115,ZL116	ZL201 ZL201A ZL203 ZL204 ZL205 ZL207	ZL301 ZL303 ZL305	ZL401 ZL402

表 9-62 铸造铝合金的特点和用途

代号	主 要 特 点	用 途 举 例
ZL101	耐蚀性、力学性能和铸造工艺性能良好,线收缩小,变质和不变质处理的铸件均可使用,淬火后可自然时效,易气焊	形状复杂的砂型、金属型和压力铸造零件;如飞机零件、仪器零件、抽水机壳体,工作温度不超过 185℃ 的气化器
ZL102	铸造工艺性能良好,密度小、耐蚀性良好、易气焊、随铸件壁厚增加强度降低的程度小,不能热处理强化,强度低,在铸件壁厚处易生成气孔,可加工性不佳,变质处理状态下使用	形状复杂的砂型、金属型和压力铸造零件,如仪表壳体、抽水机壳体,工作温度在 200℃ 以下要求高气密性承受低载荷的零件
ZL104	铸造工艺性能良好,耐蚀性尚可,强度高,焊接性能和可加工性尚可,铸造工艺较复杂,易生成气孔	砂型、金属型和压力铸造的形状复杂,在 200℃ 以下工作的零件,如发动机机匣、气缸体
ZL105	强度高,铸造性能、焊接性能和耐蚀性尚可,可加工性比 ZL104 好,形成气孔的倾向比 ZL102 和 ZL104 小,塑性比 ZL104 低,可热处理强化	砂型、金属型和压力铸造的形状复杂在 225℃ 以下工作的零件,如风冷发动机的气缸头,机匣、油泵壳体和仪器零件
ZL109	线胀系数小,强度高,耐磨性好,产生缩孔倾向较小,气密性较高,可加工性差,可热处理强化	较高温度下工作的零件:如活塞
ZL110	铸造性能好,耐蚀性较差,可加工性和焊接性能尚可,可热处理强化	砂型和金属型铸造的活塞及其他在高温下工作的零件
ZL201	铸造性能不好,合金有热裂和疏松倾向,气密性较差,耐蚀性低,焊接和可加工性良好,可热处理强化	砂型铸造在 175~300℃ 下工作的零件,如支臂、挂架梁

(续)

代号	主 要 特 点	用 途 举 例
ZL203	铸造性能差,有形成热裂和疏松的倾向,气密性尚可,耐蚀性不高,可加工性良好	砂型铸造中等载荷和形状比较简单的零件,如托架和工作温度不超过 200℃并要求切削性能好的小零件
ZL301	强度高,耐蚀性能好,密度小,可加工性好,焊接性能尚可,在熔融状态下易氧化,铸造性能差,易形成显微疏松,气密性低	砂型铸造在大气或海水中工作的零件,承受大振动载荷工作温度不超过 150℃的零件
ZL302	耐蚀性能好,铸造性能尚可,有氧化、吸气和形成缩孔的倾向,焊接性能良好,可加工性好,易抛光,不能热处理强化	腐蚀介质作用下的中等载荷零件,在严寒大气中以及工作温度不超过 200℃的零件:如海轮配件、零件和各种壳体
ZL401	铸造性能良好,缩孔和热裂倾向较小,铸态下可自然时效,焊接性能和可加工性良好,耐蚀性能低,密度较大,是一种铸态下高强度合金;砂型铸造需变质处理	压力铸造零件,工作温度不超过 200℃,结构形状复杂的汽车、飞机零件

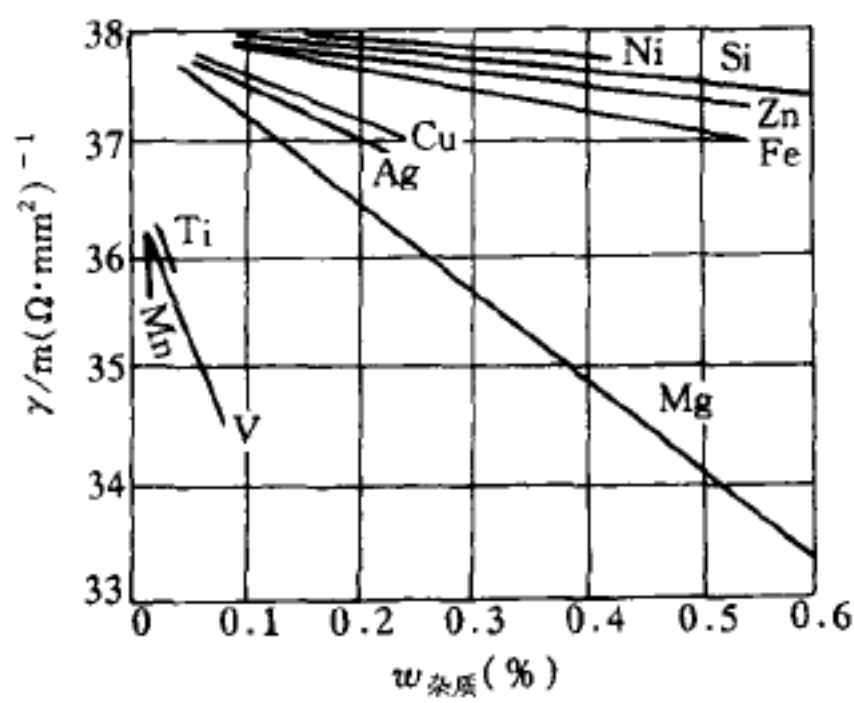


图 9-32 杂质对纯铝导电性的影响
材料:退火状态(320℃、3h)

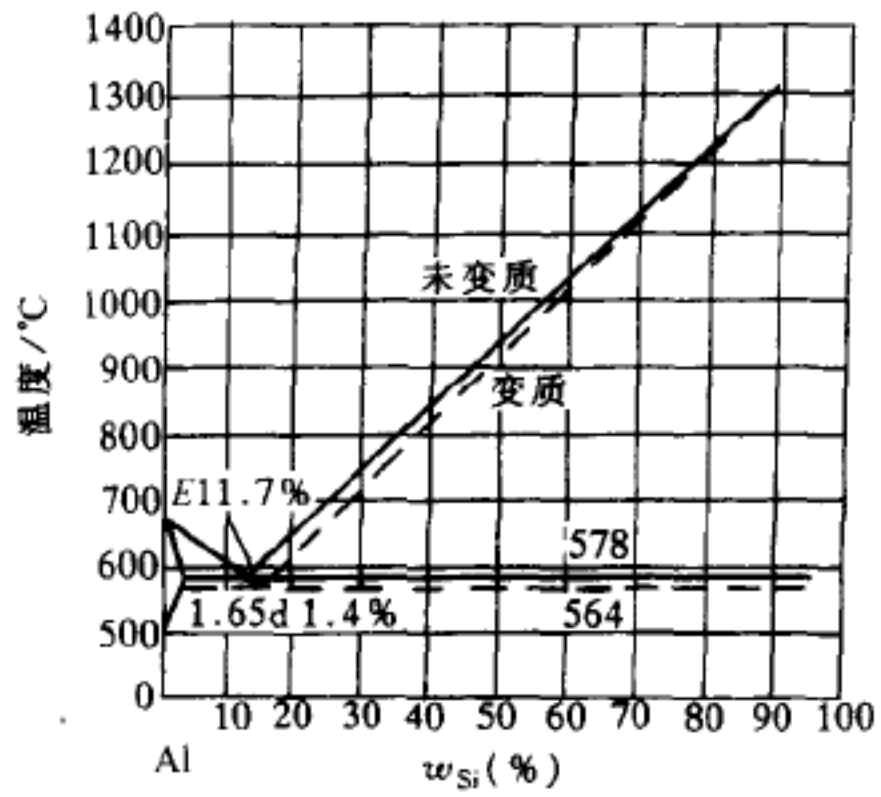


图 9-33 铝硅合金相图

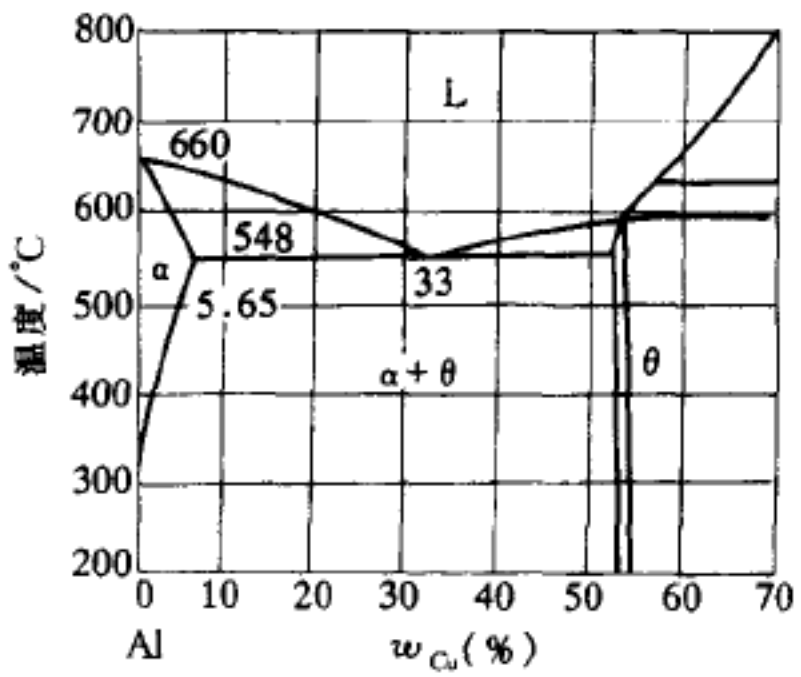


图 9-34 铝铜合金相图

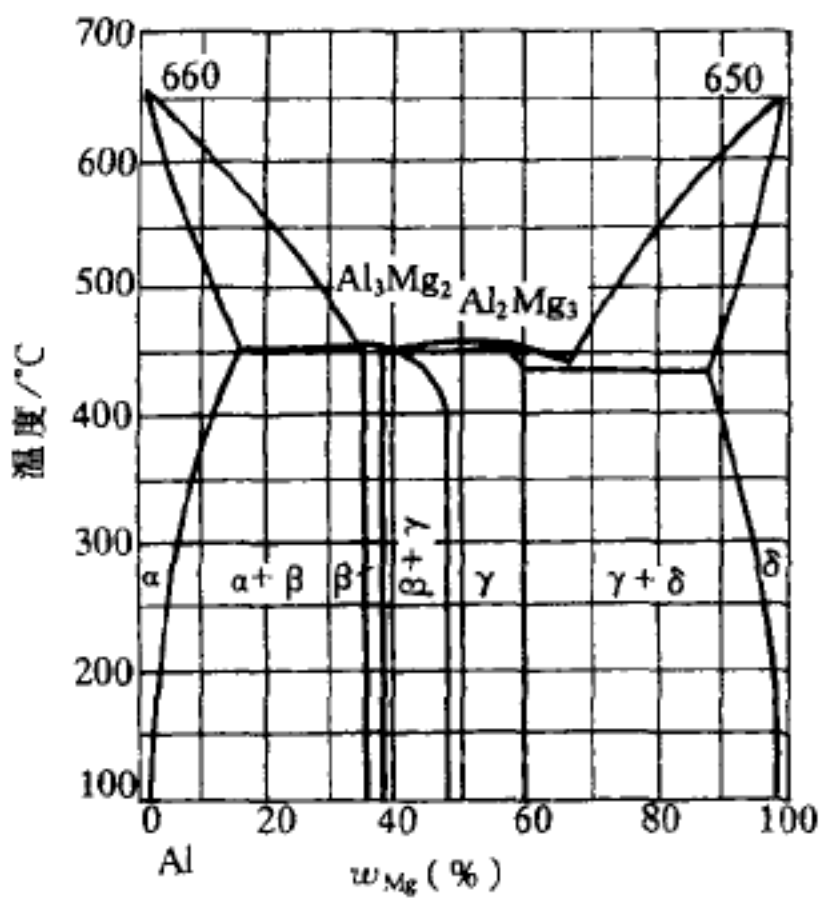


图 9-35 铝镁合金相图

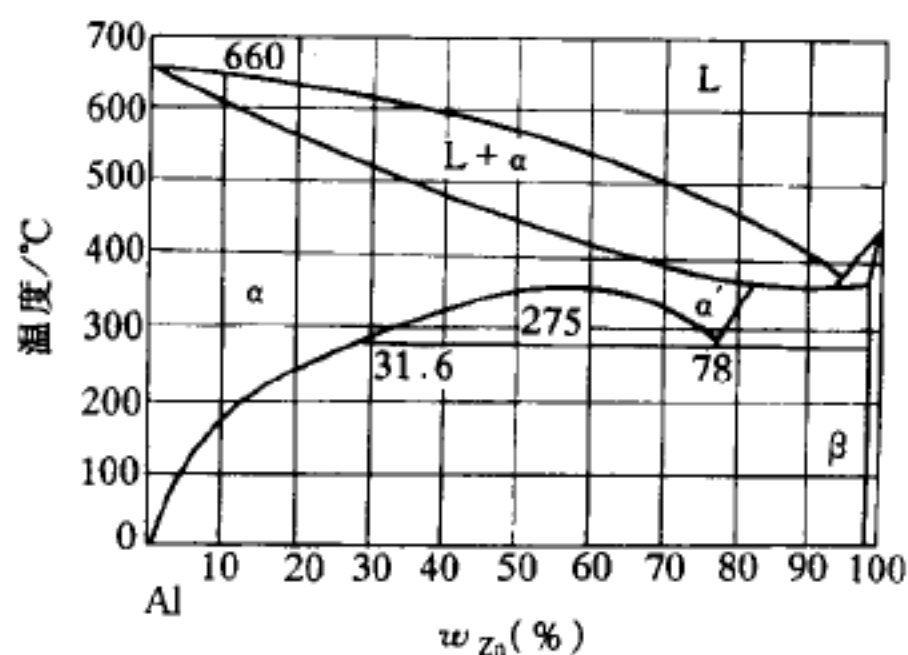


图 9-36 铝锌合金相图

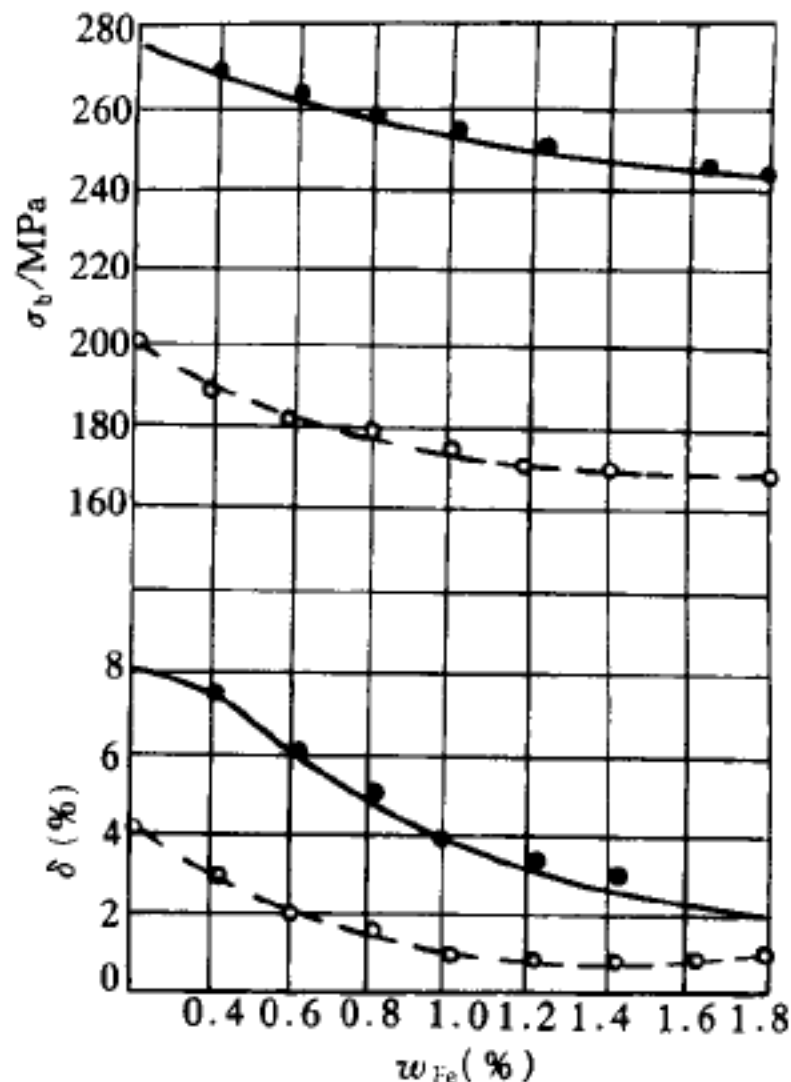


图 9-37 ZL104 合金力学性能与含铁量的关系
实线热处理状态 虚线铸造状态

表 9-63 铸造铝合金热处理工艺代号

代 号	热处理类型	工 艺 特 点	目 的 和 应 用
T1	不固溶处理,人工时效	铸造后快冷(金属型铸造、压铸或精密铸造)后直接进行人工时效	改善可加工性能,降低工件表面粗糙度
T2	退火		消除内应力,提高合金的塑性
T4	固溶处理,自然时效		提高零件的强度和耐蚀性
T5	固溶处理,不完全时效	淬火后进行短时间时效或温度较低的时效	得到一定的强度,保持一定的塑性
T6	固溶处理,充分时效		得到高强度
T7	淬火,稳定化回火	时效温度比 T5、T6 高,接近零件的工作温度	保持较高的组织稳定性和尺寸稳定性
T8	固溶处理,冷变形人工时效	进一步提高合金强度	适用于要求高强度或需校直、校平的制件
T9	固溶处理,时效,冷变形		适用于以冷变形提高强度的制件
T10	高温成形冷却,冷变形,人工时效		要求高强度的制件或需校直、校平的制件

表 9-64 铸造铝合金的热处理规范和力学性能

合金 代号	热处理 状态 ^①	固溶处理			时效			力学性能			零件工作条件及要求
		加热温 度/℃	保温时 间/h	冷 却	加热温 度/℃	保温时 间/h	冷却	σ_b /MPa	HBW	δ (%)	
ZL101	T4(J)	535 ± 5	2 ~ 6	60 ~ 100℃ 水	150 ± 5	2 ~ 4	空冷	190	50	4	要求高塑性
	T4(S)	535 ± 5	2 ~ 6	60 ~ 100℃ 水				180	50	4	要求高屈服强度,高硬度
	T5(J)							210	60	2	
	T5(S)							200	60	2	

(续)

合金代号	热处理状态 ^①	固溶处理			时效			力学性能			零件工作条件及要求
		加热温度/℃	保温时间/h	冷却	加热温度/℃	保温时间/h	冷却	σ_b /MPa	HBW	δ (%)	
ZL101	T6(SB)	535 ± 5	2 ~ 6	60 ~ 100℃水	200 ± 5	3 ~ 5	空冷	230	70	1	要求高强度
	T7(SB)	535 ± 5	2 ~ 6	60 ~ 100℃水	225 ± 5	3 ~ 5		200	60	2	要求一定强度,较高尺寸稳定性
	T8(SB)	535 ± 5	2 ~ 6	60 ~ 100℃水	250 ± 5	3 ~ 5		160	55	3	要求高的尺寸稳定性和塑性
ZL104	T1(J,Y)	—	—	—	175 ± 5	5 ~ 7		200	70	1.5	中等负荷
	T6(J)	535 ± 5	2 ~ 6	60 ~ 100℃水	175 ± 5	10 ~ 15		240	70	2	高负荷
	T6(S,B)	—	—	—	—	—		230	70	2	
ZL105	T1(S,J)	—	—	—	180 ± 5	5 ~ 10		160	65	0.5	中等负荷
	T5(S)	525 ± 5	3 ~ 5	100℃水	160 ± 5	3 ~ 5		230	70	0.5	中等负荷
	T6(J)	525 ± 5	3 ~ 5	60 ~ 100℃水	180 ± 5	5 ~ 10		260	70	0.5	高负荷
	T7(S,J)	525 ± 5	3 ~ 5	60 ~ 100℃水	240 ± 10	3 ~ 5		200	65	1.0	较高温度下工作
ZL107	T6	515 ± 5	10	60 ~ 100℃水	155 ± 5	10		—	—	—	—
ZL108	T1	—	—	—	190 ~ 210℃	10 ~ 14	—	—	—	—	—
	T6	515 ± 5	3 ~ 8	60 ~ 80℃水	205 ± 5	6 ~ 10	空冷	—	—	—	高温下工作的大负荷零件
ZL109	T1	—	—	—	230 ± 5	7 ~ 9		—	—	—	改善切削加工性的零件
	T4	535 ± 5	2 ~ 6	60 ~ 100℃水	—	—		—	—	—	要求高塑性零件
	T5	535 ± 5	2 ~ 6	60 ~ 100℃水	155 ± 5	2 ~ 7	—	—	—	—	要求屈服强度高,硬度高的零件
	T6	535 ± 5	2 ~ 6	60 ~ 100℃水	225 ± 5	7 ~ 9		—	—	—	要求高强度,高硬度的零件
	T7	535 ± 5	2 ~ 6	60 ~ 100℃水	250 ± 5	2 ~ 4		—	—	—	—
ZL201	T4(S)	535 ± 5 545 ± 5	5 ~ 9	60 ~ 100℃水	—	—	—	300	70	8	分级加热
	T5(S)	535 ± 5 545 ± 5	5 ~ 9	60 ~ 100℃水	175 ± 5	3 ~ 5	空冷	340	80	4	分级加热高强度高温工作
ZL202	T6(S)	510 ± 5	12	60 ~ 100℃水	155 ± 5	10 ~ 14		—	—	—	要求高强度高硬度零件
	T6(J)	510 ± 5	12	60 ~ 100℃水	175 ± 5	7 ~ 14		—	—	—	
	T2	—	—	—	290 ± 5	3		—	—	—	消除残留应力,要求尺寸稳定
	T7	515 ± 5	3 ~ 5	80 ~ 100℃水	200 ~ 250	3		—	—	—	高温下工作
ZL203	T4	515 ± 5	10 ~ 15	60 ~ 100℃水	—	—	—	220	65	8	高强、高塑性零件
	T5	515 ± 5	10 ~ 15	60 ~ 100℃水	150 ± 5	2 ~ 4	—	250	80	5	高屈服强度,高硬度
ZL301	T4	435 ± 5	8 ~ 20	80 ~ 100℃水	—	—	—	350	80	10	—

注:J——金属型;S——砂型;B——不变质。

① 符号含义见表 9-63。

表 9-65 铝合金铸件热处理工艺参数

代 号	热处理 状态 ^①	淬 火			时 效			用 途 举 例
		加热温度 /℃	保温时间 /h	冷 却 (水中)	加热温度 /℃	保温时间 /h	冷却	
ZL101	T1	—	—	—	230 ± 5	7 ~ 9	空冷	改善可加工性 要求高塑性的零件 要求提高屈服强度和硬度的零件 要求高强度和高硬度的零件
	T4	535 ± 5	2 ~ 6	60 ~ 100℃	—	—	空冷	
	T5	535 ± 5	2 ~ 6	60 ~ 100℃	155 ± 5	2 ~ 7	空冷	
	T6	535 ± 5	2 ~ 6	60 ~ 100℃	225 ± 5	7 ~ 9	空冷	
	T7	535 ± 5	2 ~ 6	60 ~ 100℃	250 ± 5	2 ~ 4	空冷	
ZL102	T2	—	—	—	290 ± 10	2 ~ 4	空冷	轻载荷的零件
ZL103	T1	—	—	—	180 ± 5	3 ~ 5	空冷	轻载荷的零件 要求尺寸稳定并消除应力的零件 在低于 175℃ 下工作重载荷的零件 在 175 ~ 250℃ 工作的零件 要求有高塑性的零件
	T2	—	—	—	290 ± 10	2 ~ 4	空冷	
	T5	515 ± 5	3 ~ 6	60 ~ 100℃	175 ± 5	3 ~ 5	空冷	
	T7	515 ± 5	3 ~ 6	60 ~ 100℃	230 ± 5	3 ~ 5	空冷	
	T8	510 ± 5	5 ~ 6	60 ~ 100℃	330 ± 5	3	空冷	
ZL104	T1	—	—	—	175 ± 5	5 ~ 15	空冷	受中等载荷的零件 受重载荷的零件
	T6	535 ± 5	2 ~ 6	60 ~ 100℃	175 ± 5	10 ~ 15	空冷	
ZL105	T1	—	—	—	180 ± 5	5 ~ 10	空冷	受中等载荷的零件 受中等载荷的零件 受重载荷的零件 在较高温度下工作的零件:如气缸头
	T5	525 ± 5	3 ~ 5	100℃	160 ± 10	3 ~ 5	空冷	
	T6	525 ± 5	3 ~ 5	60 ~ 100℃	180 ± 5	5 ~ 10	空冷	
	T7	525 ± 5	3 ~ 5	60 ~ 100℃	240 ± 10	3 ~ 5	空冷	
ZL107	T6	515 ± 5	10	60 ~ 100℃	155 ± 5	10	空冷	—
ZL108	T1	—	—	—	200 ± 10	10 ~ 14	空冷	— 重载荷高温下工作的零件:如大马力 柴油机活塞
	T6	515 ± 5	3 ~ 8	60 ~ 80℃	205 ± 5	6 ~ 10	空冷	
ZL109	T6	500 ± 5	5	80℃	185 ± 5	16	空冷	高温高速大马力活塞
ZL110	T1	—	—	—	210 ± 10	10 ~ 16	空冷	高温下工作的活塞及其他零件
ZL201	T4	分级加热 535 ± 5 } 545 ± 5 }	7 ~ 9 7 ~ 9	60 ~ 100℃	—	—	—	要求高塑性的铸件 要求高屈服强度的零件
	T5	分级加热 535 ± 5 } 545 ± 5 }	7 ~ 9 7 ~ 9	60 ~ 100℃	175 ± 5	3 ~ 5	空冷	
ZL202	T2	—	—	—	290 ± 10	3	空冷	消除应力稳定尺寸的零件 要求高强度高硬度的零件 高温下工作的零件:如活塞
	T6	510 ± 5	12	80 ~ 100℃	155 ± 5(S) 175 ± 5(J)	10 ~ 14 7 ~ 14	空冷	
	T7	510 ± 5	3 ~ 5	80 ~ 100℃	200 ~ 250	3	空冷	
ZL203	T4	515 ± 5	10 ~ 15	60 ~ 100℃	—	—	—	要求高强度高塑性的零件 要求高屈服强度高硬度的零件
	T5	515 ± 5	10 ~ 15	60 ~ 100℃	150 ± 5	2 ~ 4	空冷	
ZL301	T4	435 ± 5	8 ~ 20	80 ~ 100℃ 或 60℃ 油	—	—	—	要求耐蚀和承受冲击载荷的零件
ZL302	T1	—	—	—	170 ± 5	4 ~ 6	空冷	—
ZL401	T2	—	—	—	290 ± 5	3	空冷	消除应力稳定尺寸的零件
ZL402	T1	—	—	—	180 ± 5 或室温	10 21 天	空冷	—

① 符号含义见表 9-63。

表 9-66 铸造铝合金高温力学性能

代 号	铸造方法 及热处理 种类 ^①	高温短时强度 /MPa						持久强度 (100h)/MPa			蠕变强度 (300℃, 100h)/MPa	
		100℃	150℃	175℃	200℃	250℃	300℃	200℃	250℃	300℃	总变形	残余变形
ZL101	S, T4	180	160	—	160	150	—	—	—	—	—	—
	S, T5	—	—	—	140	110	9.0	60	45	28	—	12
ZL102	S, T2	—	—	—	150	130	8.0	70	40	28	—	12
ZL103	S, T5	—	—	—	180	150	10.0	90	60	35	—	25
ZL104	S, T6	220	190	180	160	110	10.0	80	50	25	1.0	—
ZL105	S, T5	260	250	—	220	180	13.0	80	46	24	1.5	—
	S, T6	—	—	—	180	150	11.0	90	60	35	—	24
ZL201	S, T4	—	—	270	270	180	14.0	—	110	65	4.0	—
	S, T5	—	—	280	280	200	15.0	150	115	65	4.0	—
ZL203	S, T4	250	240	—	210	150	—	—	—	—	—	—
ZL301	S, T4	—	—	—	220	150	9.0	80	40	15	—	10

① 符号含义见表 9-63 和表 9-64。

表 9-67 铸造铝合金低温力学性能

代 号	试验温度/℃	σ_b /MPa	δ (%)
ZL102	-50	192	7.4
	-74	193	6.0
	-140	205	6.0
	-183	265	5.9
ZL104	-50	231	5.0
	-74	239	4.8
	-140	239	4.8
	-183	278	4.8
ZL302	-50	178	2.8
	-74	192	3.0
	-140	200	3.0
	-183	215	3.0

表 9-68 铸造铝合金物理性能

代号	密 度 ρ /g·cm ⁻³	线胀系数 α (20~100℃) /×10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹	热导率 λ (25℃) /×418.68W·(m·K) ⁻¹	比热容 c (100℃) /×4.2J·(g·℃) ⁻¹	电阻率 ρ (20℃) /Ω·mm ² ·m ⁻¹
ZL101	2.66	23	0.36	0.21	0.0457
ZL102	2.65	21.1	0.37	0.2	0.0548
ZL103	2.7	22	0.39	0.22	0.0449
ZL104	2.65	21.7	0.35	0.18	0.0468
ZL105	2.68	23.1	0.38	0.2	0.0462
ZL109	2.68	19	0.28	0.23	0.0594
ZL110	2.89	22.3	—	0.23	0.0721
ZL201	2.78	19.5	0.27	0.20	0.0595
ZL202	2.91	22	0.32	0.23	0.0522
ZL203	2.8	23	0.37	0.2	0.0433
ZL301	2.55	24.5	0.22	0.25	0.0912
ZL302	2.6	20	0.3	0.23	0.0643
ZL401	2.94	24.5	—	0.21	—
ZL402	2.81	24.7	0.33	0.23	0.0493

表 9-69 铸造铝合金工艺性能比较

代号	流动性	抗形成缩孔倾向	气密性	抗形成裂纹倾向	抗形成气孔倾向	切削性能	焊接性能	耐蚀性能
ZL101	优	良	优	优	良	中	良	中
ZL102	优	良	优	优	中	劣	良	良
ZL103	良	良	良	中	良	中	良	差
ZL104	优	良	良	优	中	中	中	中
ZL105	良	良	良	良	良	中	良	中
ZL203	差	差	中	劣	中	良	良	差
ZL301	中	劣	劣	中	中	良	中	优
ZL302	中	差	差	中	中	良	良	良

表 9-70 铸造铝合金力学性能

代 号	铸造方法 ^①	热处理状态 ^①	力学性能(不小于)			代 号	铸造方法 ^①	热处理状态 ^①	力学性能(不小于)		
			σ_b /MPa	δ_5 (%)	HBW				σ_b /MPa	δ_5 (%)	HBW
ZL101	S、J	—	160	2	50	ZL107	SB	—	170	2	65
	S、J	T2	140	2	45		SB	T6	250	2.5	90
	J	T4	190	4	50		J	—	200	2.5	70
	S	T4	180	4	50		J	T6	280	3	100
	J	T5	210	2	60	ZL108	J	T1	200	—	85
	S	T5	200	2	60		J	T6	260	—	90
	SB	T6	230	1	70	ZL109	J	T1	200	0.5	90
	SB	T7	200	2	60		J	T6	250	—	100
	SB	T8	160	3	55						
ZL102	SB、JB	—	150	4	50	ZL110	S	—	130	—	80
	SB、JB	T2	140	4	50		J	—	160	—	80
	J	—	160	2	50		S	T1	150	—	80
	J	T2	150	3	50		J	T1	170	—	90
ZL103	S	—	140	0.5	65	ZL111	J	—	210	2	80
	J	—	170	0.5	65		J	T6	320	2	100
	S、J	T1	170	—	70	ZL201	S	T4	300	8	70
	S、J	T2	150	1	65		S	T5	340	4	90
	S	T5	220	0.5	75	ZL202	S、J	—	110	—	50
	J	T5	250	0.5	75		S、J	T6	170	—	100
	S、J	T7	210	1	70						
	S、J	T8	180	2	65						
ZL104	S、J	—	150	2	50	ZL203	S	T4	200	6	60
	J	T1	200	1.5	70		J	T4	210	6	60
	SB	T6	230	2	70		S	T5	220	3	70
	J	T6	240	2	70		J	T5	230	3	70
ZL105	S、J	T1	160	0.5	65	ZL301	S	T4	280	9	60
	S	T5	200	1	70	ZL302	S、J	—	150	1	55
	J	T5	240	0.5	70						
	S	T6	230	0.5	70	ZL401	S	T1	200	2	80
	J	T7	180	1	65		J	T1	250	1.5	90
ZL106	SB	—	180	1	75	ZL402	J	T1	240	4	70
	SB	T6	250	1	90		S	T1	220	4	65

注: ZL101、ZL102 和 ZL104 合金可用于压力铸造。

① 符号含义见表 9-63 和表 9-64。

表 9-71 硬铝的分类和性能

类 别	合金元素作用和强化相	性 能	热处理
Al-Cu-Mg	显微组织中有 α 、 CuAl_2 (θ)、 Al_2CuMg (ζ)、 Al_3Mg_2 (β)、 $\text{Mg}_{32}(\text{Al},\text{Cu})$ (T) 5 种相。其中 θ 和 ζ 是热处理强化相。Cu 和 Mg 多强化效果大, ζ 相多耐热性好, Mn 可中和 Fe 的负影响, 提高 α 相强度、降低塑性。Ti 细化晶粒减少热裂, Fe 和 Si 是杂质, Fe 和 Cu 形成 $\text{Al}_9\text{Cu}_2\text{Fe}$ 减少 θ 和 ζ 相, 减弱强化, Fe 和 SiMn 形成粗大 $(\text{FeMnSi})\text{Al}_6$ (Fe, Mn) Al_6 脆性相、劣化工艺性能	强度、硬度高、高温性能好, 焊接性好, 焊后热处理焊缝强度可达基体的 90% ~ 95%, 不热处理时仅为 60% ~ 75%	固溶, 人工时效
Al-Cu-Mn	含 $w_{\text{Cu}} 6.0\% \sim 6.5\%$ 、再结晶温度和持久强度高、加适量 $w_{\text{Mn}} (0.4\% \sim 0.8\%)$ 形成弥散 $\text{T}(\text{Cu}_2\text{Mn}_3\text{Al}_{20})$ 相, 热强性高。Ti 可细化晶粒, 稳定组织, 提高再结晶温度、加入 $w_{\text{Mg}} 0.25\% \sim 0.45\%$ 可提高室温强度, 改善 150 ~ 250℃ 耐热性, 但焊接性劣化。Zn、Fe 和 Si 是杂质, Zn、Si 降低耐热性, Fe 降低 Cu 在固溶体的溶解度, 降低其强度	强度高, 耐热性好, 耐蚀性低	固溶, 人工时效
Al-Cu-Li	Li 和 Mg 作用类似, 需和 Cd 一起加入, 亦可用 In 和 Sn 代替 Cd	室温强度高, 在 150 ~ 225℃ 的耐热性好, 密度小, 交变载荷敏感性小, 弹性模量高, 是超音速飞机蒙皮的好材料	515 ~ 525℃ 固溶, 150 ~ 165℃ 人工时效

表 9-72 硬铝主要特点和用途举例

代 号	产品种类	主 要 特 点	用 途 举 例
2A01 (LY1)	线	热态下塑性好, 冷态下塑性尚可, 焊接性与 2A11 (LY11) 相同。耐蚀性不高, 可加工性能尚可, 铆钉在淬火和时效后进行铆接, 铆接过程中不受热处理后时间限制	中等强度、工作温度不超过 100℃ 的结构用铆钉
2A04 (LY4)	线	有较高的抗剪强度和耐热性, 可加工性能和 2A12 (LY12) 相同, 退火和刚淬火状态塑性尚可, 可热处理强化	结构工作温度为 120 ~ 250℃ 的铆钉
2B11 (LY8)	线	有中等抗剪强度, 退火和刚淬火状态塑性尚可, 可热处理强化, 铆钉必须在淬火后 2h 内铆接	中等强度的铆钉
2A11 (LY11)	板、棒、管、型、锻件	退火、刚淬火和热态下塑性尚可, 可热处理强化, 点焊焊接性良好, 以本身为焊料进行气焊和氩弧焊时有裂纹倾向	中等强度的结构零件, 如骨架、模锻的固定接头、支柱、螺旋桨叶, 局部锻粗的零件、螺栓和铆钉
2A12 (LY12)	板、棒、管、型	退火和刚淬火状态塑性尚可, 可热处理强化, 点焊焊接性良好, 气焊和氩弧焊有晶间裂纹倾向, 焊缝气密性尚可, 焊缝塑性低, 热处理和冷作硬化后可加工性尚可, 退火的加工性低, 耐蚀性不高	高强度结构件, 如骨架、蒙皮、隔框、肋、梁、铆钉等 150℃ 以下工作的零件
2A16 (LY16)	板、棒、线	热态下塑性尚可, 无挤压效应, 可热处理强化, 点焊、滚焊和氩弧焊焊接形成裂纹倾向不显著, 焊缝气密性尚可	250 ~ 350℃ 下工作的零件, 如压缩机叶轮盘, 常温和高温下工作的焊接容器

表 9-73 变形铝合金固溶处理加热温度及熔化开始温度

合金代号	强化相(括号中为少量的)	加热温度/℃	熔化开始温度/℃
2A01(LY1)	$\text{CuAl}_2, \text{Mg}_2\text{Si}$	495 ~ 505	535
2A02(LY2)	$\text{Al}_2\text{CuMg}(\text{CuAl}_2, \text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu})$	495 ~ 506	510 ~ 515
2A06(LY6)	$\text{Al}_2\text{CuMg}(\text{CuAl}_2, \text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu})$	503 ~ 507	518
2A10(LY10)	$\text{CuAl}_2(\text{Mg}_2\text{Si})$	515 ~ 520	540
2A11(LY11)	$\text{CuAl}_2, \text{Mg}_2\text{Si}(\text{Al}_2\text{CuMg})$	500 ~ 510	514 ~ 517
2A12(LY12)	$\text{CuAl}_2, \text{Al}_2\text{CuMg}(\text{Mg}_2\text{Si})$	495 ~ 503	506 ~ 507
2A16(LY16)	$\text{CuAl}_2, \text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu}(\text{TiAl}_3)$	528 ~ 593	545
2A17(LY17)	$\text{CuAl}_2, \text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu}(\text{TiAl}_3, \text{Al}_2\text{CuMg})$	520 ~ 530	540
6A02(LD2)	$\text{Mg}_2\text{Si}, \text{Al}_2\text{CuMg}$	515 ~ 530	595
2A50(LD5)	$\text{Mg}_2\text{Si}, \text{Al}_2\text{CuMg}, \text{Al}_2\text{CuMgSi}$	503 ~ 525	> 525
2A70(LD7)	$\text{Al}_2\text{CuMg}, \text{Al}_9\text{FeNi}$	525 ~ 595	—
2A80(LD8)	$\text{Al}_2\text{CuMg}, \text{Mg}_2\text{Si}, \text{Al}_9\text{FeNi}$	525 ~ 540	—
2A90(LD9)	$\text{Al}_2\text{CuMg}, \text{Mg}_2\text{Si}, \text{Al}_9\text{FeNi}, \text{AlCu}_3\text{Ni}$	510 ~ 525	—
2A14(LD10)	$\text{CuAl}_2, \text{Mg}_2\text{Si}, \text{Al}_2\text{CuMg}$	495 ~ 506	509
LC3	$\text{MgZn}_2(\text{Al}_2\text{Mg}_2\text{Zn}_3, \text{Al}_2\text{CuMg})$	460 ~ 470	> 500
LC4	$\text{MgZn}_2(\text{Al}_2\text{Mg}_2\text{Zn}_3, \text{Al}_2\text{CuMg}, \text{Mg}_2\text{Si})$	465 ~ 485	> 500

表 9-74 变形铝合金制品实测过烧温度

合金牌号	制品种类	制品规格 /mm	变形程度 (%)	加热方式	保温时间 /min	过烧温度 /℃
2A02(LY2)	棒材	D20	$\epsilon = 99.4$	强制空气循环炉	40	515
2A06(LY6)	板材	3.0	$\epsilon = 54.0$	盐浴炉	20	515
	棒材	—	—	盐浴炉	30	510
2A11(LY11)	板材	3.0	$\epsilon = 54.0$	盐浴炉	20	514
	棒材	D14	$\epsilon = 94.5$	强制空气循环炉	40	514
	冷拉管材	D110 × 3.0	$\epsilon = 9.0$	盐浴炉	20	512
2A12(LY12)	板材	2.0	$\epsilon = 60.0$	盐浴炉	17	505 ~ 507
	棒材	D15	$\epsilon = 94.3$	强制空气循环炉	40	505
	冷拉管材	D40 × 1.5	$\epsilon = 73.3$	盐浴炉	20	507
	冷拉管材	D80 × 2.0	$\epsilon = 24.0$	盐浴炉	20	505
2A16(LY16)	板材	1.6	$\epsilon = 53.0$	盐浴炉	17	547
	棒材	D12	$\epsilon = 95.0$	强制空气循环炉	40	547
2A17(LY17)	棒材	D30	—	盐浴炉	30	535
6A02(LD2)	板材	4.0	$\epsilon = 40$	盐浴炉	27	565
	棒材	D22	$\epsilon = 95$	空气循环炉	40	565
2A50(LD5)	棒材	D22	$\epsilon = 95$	空气循环炉	40	545
	锻件	—	—	空气循环炉	40	545
2B50(LD6)	锻件	—	—	空气循环炉	40	550
2A70(LD7)	棒材	D22	$\epsilon = 94.4$	空气循环炉	40	545
	锻件	—	—	空气循环炉	40	545
2A14(LD10)	板材	2.0	$\epsilon = 60.0$	盐浴炉	17	517
	棒材	D20	$\epsilon = 94.4$	空气循环炉	40	515
	锻件	—	—	空气循环炉	40	517

表 9-75 固溶温度对 2A12(LY12)合金性能的影响

淬火温度 /℃	拉伸性能		晶 间 腐 蚀				最大应力 σ_{max} /MPa	K σ_{max}/σ_b	至破坏的 循环次数 N
	σ_b /MPa	δ (%)	σ_b /MPa	δ (%)	强度损失 (%)	伸长率损失 (%)			
500	487	21.6	487	20.6	0	45	304	0.7	8841
513	489	18.4	431	8.5	10	53	308	0.7	8983
517	478	18.1	348	4.1	27	77	304	0.7	8205

表 9-76 几种变形铝合金在盐浴炉中固溶加热保温时间

合 金	板材厚度棒材直径 /mm	加 热 时 间 /min	板材厚度棒材直径 /mm	加 热 时 间 /min
2A06(LY6)、 2A11(LY11)、 2A12(LY12) 包铝 板材	0.3~0.8 1.0~1.5 1.6~2.5 2.6~3.5 3.6~4.0 4.1~6.0	9 10 17 20 27 32	6.1~8.0 8.1~12.0 12.1~25.0 25.1~32.0 32.1~38.0	35 40 50 60 70
2A11(LY11)、 2A12(LY12) 不包铝 板材	0.3~0.8 0.9~1.2 1.3~2.0 2.1~2.5	12 18 20 25	2.6~3.5 3.6~5.0 5.1~6.0 >6.0	30 35 50 60
6A02(LD2)、 7A04(LC4) 不包 铝板 材	0.3~0.8 1.0~1.5 1.6~2.0 2.1~2.5 2.6~3.0	9 12 17 20 22	3.1~3.5 3.6~4.0 4.1~5.0 5.1~6.0 >6.0	27 32 35 40 80

表 9-77 几种变形铝合金在空气炉中固溶加热保温时间

合 金	棒材、线材直径型材、 锻件厚度/mm	加 热 时 间 /min			
铝合金棒材、型材	<3.0	制品长度小于 13m	30	制品长度大于 13m	45
	3.1 ~ 5.0		45		60
	5.1 ~ 10.0		60		75
	10.1 ~ 12.0		75		90
	12.1 ~ 30.0		90		100
	30.1 ~ 40.0		105		135
	40.1 ~ 60.0		150		150
	60.1 ~ 100.0		180		180
	> 100.0		210		210
2B11(LY8)(线材)	所有尺寸	60			
铝合金锻件	< 30.0	75			
	31 ~ 50	100			
	51 ~ 100	120 ~ 150			
	101 ~ 150	180 ~ 210			

表 9-78 7A04(LC4)合金板材淬火转移时间对力学性能的影响

淬火转移时间 /s	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 (%)	淬火转移时间 /s	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 (%)
3	522	493	11.2	30	480	377	11.0
10	515	475	10.7	40	418	347	11.0
20	507	452	10.3	60	396	310	11.0

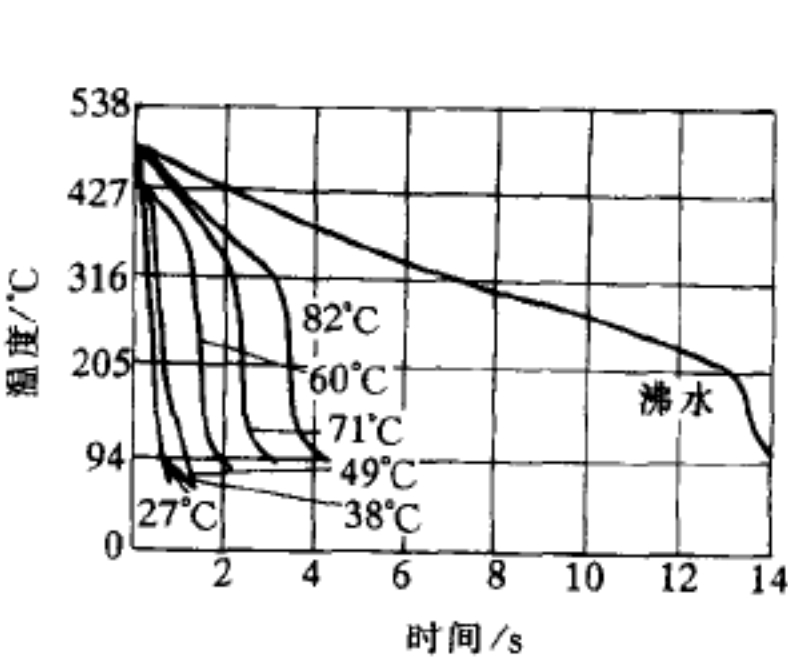


图 9-38 纯铝板材在水中淬火时的冷却曲线
(板厚 1.6mm, 曲线上的数字表示水温)

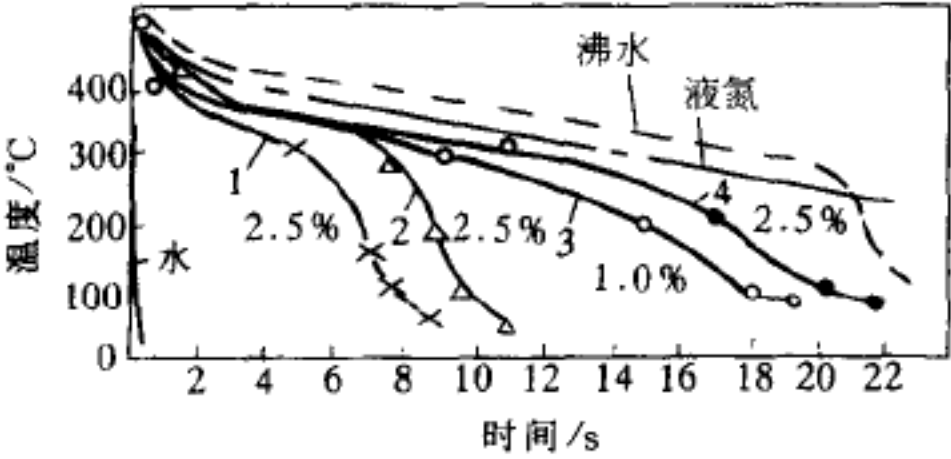


图 9-39 厚度为 5mm 的铝板在聚醚水溶液中淬火时的冷却曲线
1—相对分子质量为 0.5×10^6
2—相对分子质量为 1×10^6
3—相对分子质量为 3.3×10^6
4—相对分子质量为 5×10^6
(曲线旁边的数字表示聚醚液的浓度)

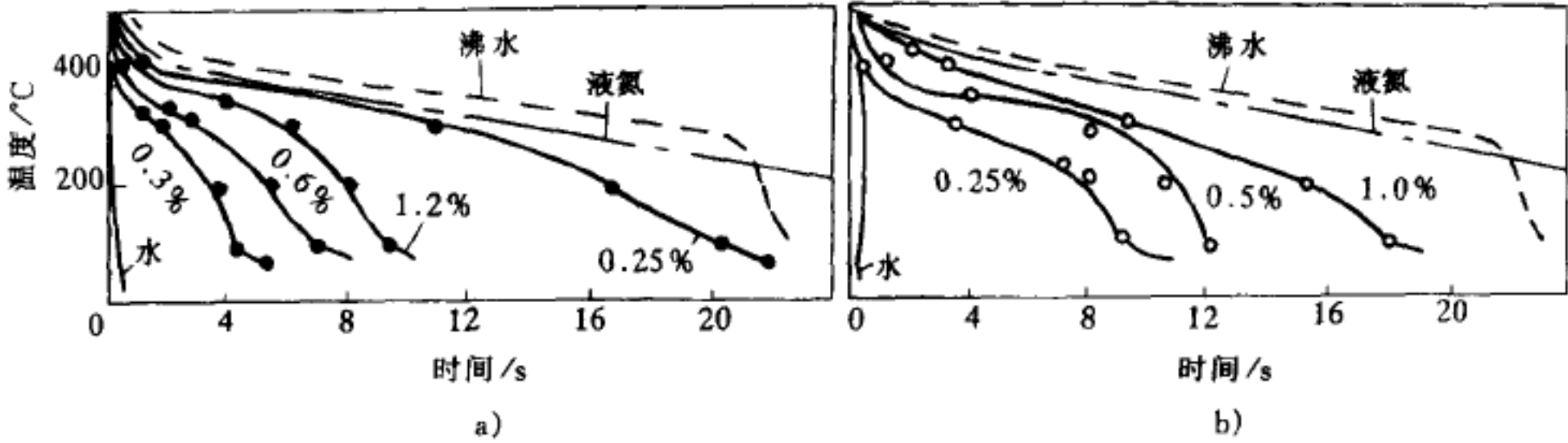


图 9-40 厚度为 5mm 的铝板在不同浓度的聚醚水溶液中淬火时的冷却曲线
(曲线旁边的数字表示聚醚液的浓度)

a) 相对分子质量为 3.3×10^6 b) 相对分子质量为 5×10^6

表 9-79 5mm 厚铝板在聚醚水溶液中的冷却速度

淬火介质	相对分子质量	含量 (%)	在下列温度范围内的冷却速度/ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$		
			500 ~ 380 $^{\circ}\text{C}$	380 ~ 200 $^{\circ}\text{C}$	200 ~ 100 $^{\circ}\text{C}$
聚醚水溶液	5×10^6	1	80	10 ~ 20	30
		0.5	100	20 ~ 60	80
		0.25	280 ~ 100	20	70
		0.12	500	20 ~ 30	100

(续)

淬 火 介 质	相对分子质量	含 量 (%)	在下列温度范围内的冷却速度/℃·s ⁻¹		
			500 ~ 380℃	380 ~ 200℃	200 ~ 100℃
聚醚水溶液	3.3 × 10 ⁶	2.5	50 ~ 70	15 ~ 20	30
		1.2	70 ~ 80	20 ~ 30	70
		0.6	110 ~ 160	20 ~ 50	100
		0.3	160 ~ 260	30 ~ 60	120 ~ 190
		0.15	300 ~ 420	20 ~ 60	120 ~ 140
	1 × 10 ⁶	2.5	90	40 ~ 60	50
		1.2	140	20	150
		0.6	170	350	100

表 9-80 D16 板材(厚 2mm、5mm)固溶处理 + 自然时效后的性能

热处理规范	σ_b	$\sigma_{0.2}$	δ (%)		电导率 /S·m ⁻¹
	/MPa				
0.25% 聚醚水溶液中淬火 + 自然时效	46	28.5	20.5	93.0	18.2
0.12% 聚醚水溶液中淬火 + 自然时效	46	29.0	20.3	93.5	18.6
20℃ 水中淬火 + 自然时效	46	29.0	19.2	92.5	18

表 9-81 铝板淬火翘曲变形量测定值

淬 火 介 质	含量 (%)	在各点上的翘曲量/mm							
		1	2	3	4	5	6	7	8
相对分子质量为 5 × 10 ⁶ 的聚醚水溶液	0.25	0.80	3.90	0.40	0	0.85	3.2	0	0
相对分子质量为 5 × 10 ⁶ 的聚醚水溶液	0.12	0.50	5.1	0	0.60	0.50	1.55	0	0.55
20℃ 水	—	2	6	3	0	15.5	9.2	7.0	0

注:淬火 + 自然时效后测量 5 个试样的平均值。

表 9-82 2A16(LY16)锻件一次淬火和分级淬火并时效后的力学性能

力学性能	一次淬火 (30℃ 水)	在不同温度的熔盐中分级淬火			
		160℃	170℃	180℃	190℃
σ_b /MPa	449	432	443	433	455
$\sigma_{0.2}$ /MPa	304	299	307	303	310
δ (%)	14.3	9.8	11.4	13.4	15.0

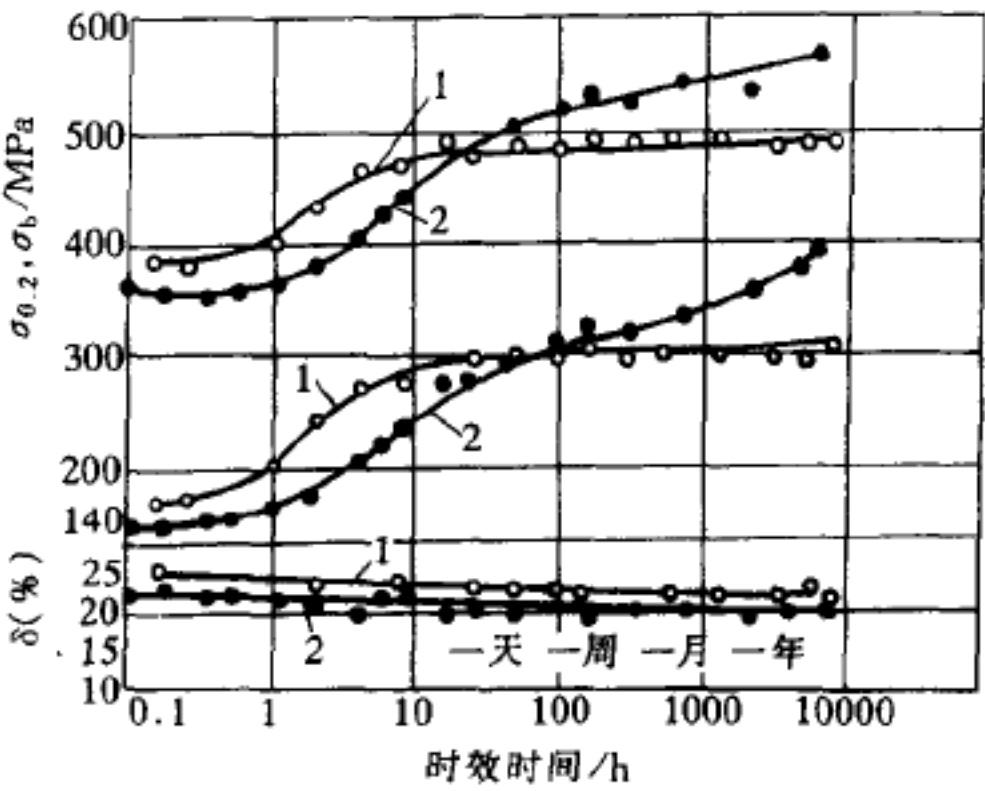


图 9-41 2024 和 7075 合金自然时效硬化曲线

1—2024(相当于 LY12)493℃, 20min 2—7075(相当于 LC4)466℃, 20min, 1mm 厚的板材冷水淬火

表 9-83 常用变形铝合金时效规范

合金牌号	制品种类	时效温度/℃	时效时间/h	合金牌号	制品种类	时效温度/℃	时效时间/h
2A02 (LY2)	管、棒、型、锻件	165 ~ 170	16	2A50 (LD5)	管、棒、型材	150 ~ 155	3
2A06 (LY6)	板 材	室 温	≥96	2B50 (LD6)	锻 件	153 ~ 160	6 ~ 12
	板 材	125 ~ 135	10	2A70 (LD7)	管、棒、型材	150 ~ 155	3
2A11 (LY11)	板 材	室 温	≥96		锻 件	153 ~ 160	6 ~ 12
2A12 (LY12)	板 材	室 温	≥96	2A80 (LD8)	管、棒、型材	185 ~ 190	8
2A16 (LY16)	板 材	160 ~ 170	14		锻 件	185 ~ 190	10 ~ 14
	管、棒、型材	165 ~ 170	16	2A90 (LD9)	管、棒、型材	170 ~ 175	8
2A17 (LY17)	板 材	室 温	≥96		锻 件	160 ~ 180	8 ~ 12
7A04 (LC4)	板 材	125 ~ 135	16	2A14 (LD10)	管、棒、型材	165 ~ 170	8
	管、棒、型材	138 ~ 143	16		板 材	室 温	≥96
	锻 件	130 ~ 140	16	6A02 (LD2)	板 材	155 ~ 165	12
7A09 (LC9)	板 材	125 ~ 135	16		管、棒、型材	150 ~ 155	8
7A10 (LC10)	板 材	125 ~ 135	16		管、棒、型材	155 ~ 160	8
	线 材	150 ~ 160	8		锻 件	150 ~ 165	8 ~ 15
2A50 (LD5)	板 材	室 温	≥96		板 材	室 温	240 ~ 360

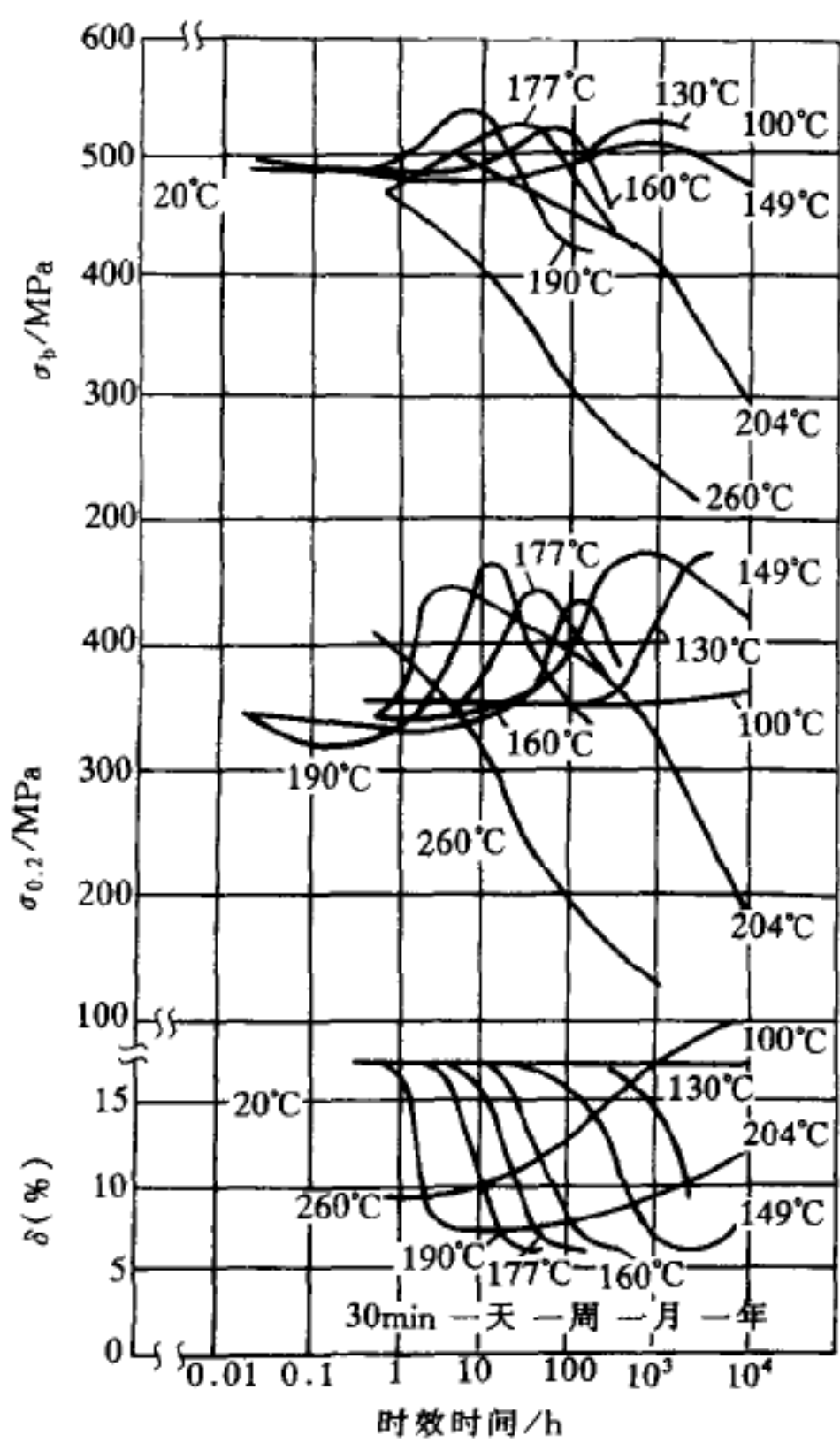


图 9-42 2024(相当于 LY12)板材人工时效硬化曲线

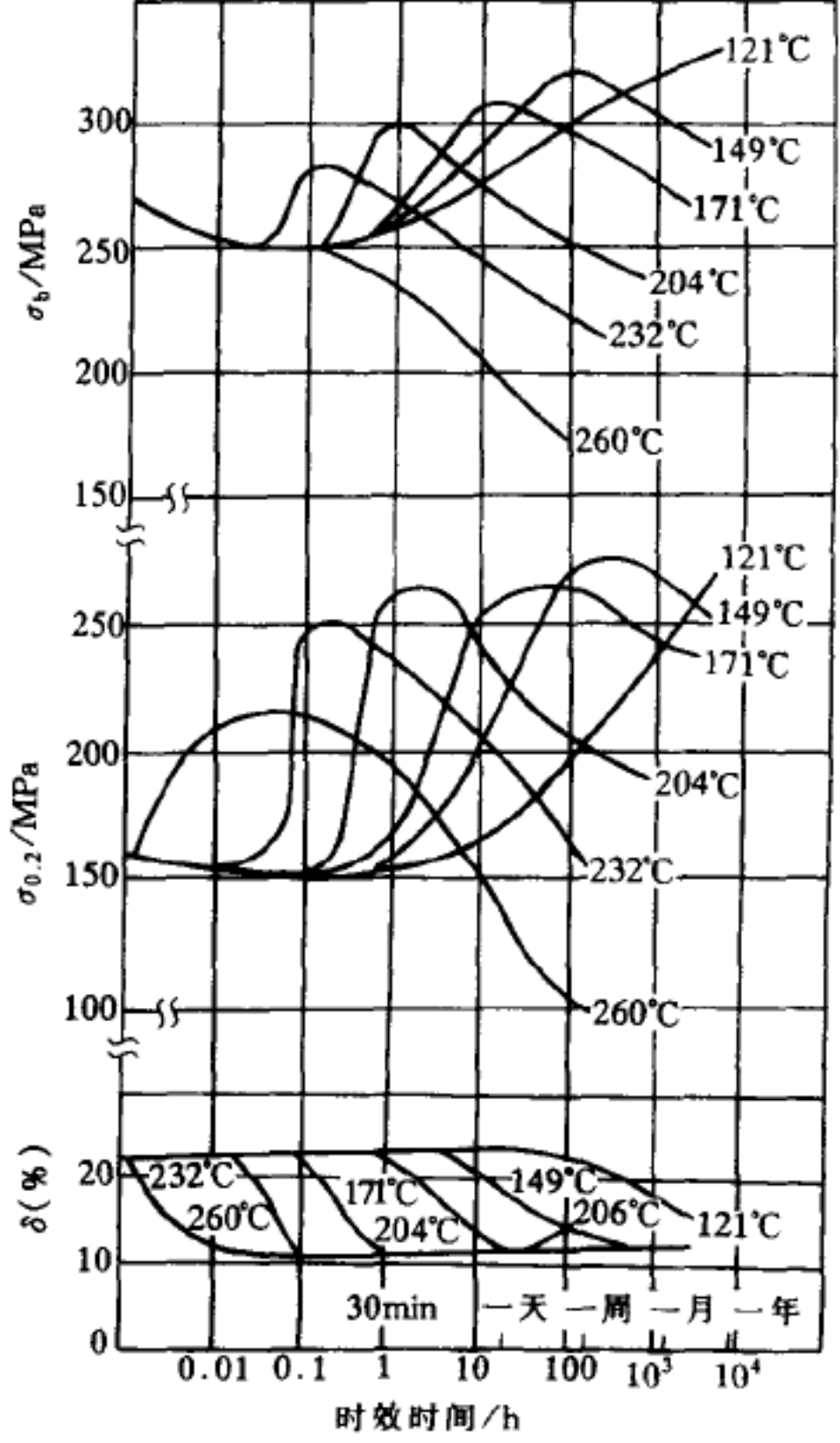


图 9-43 6061(相当于 LD2)板材人工时效硬化曲线

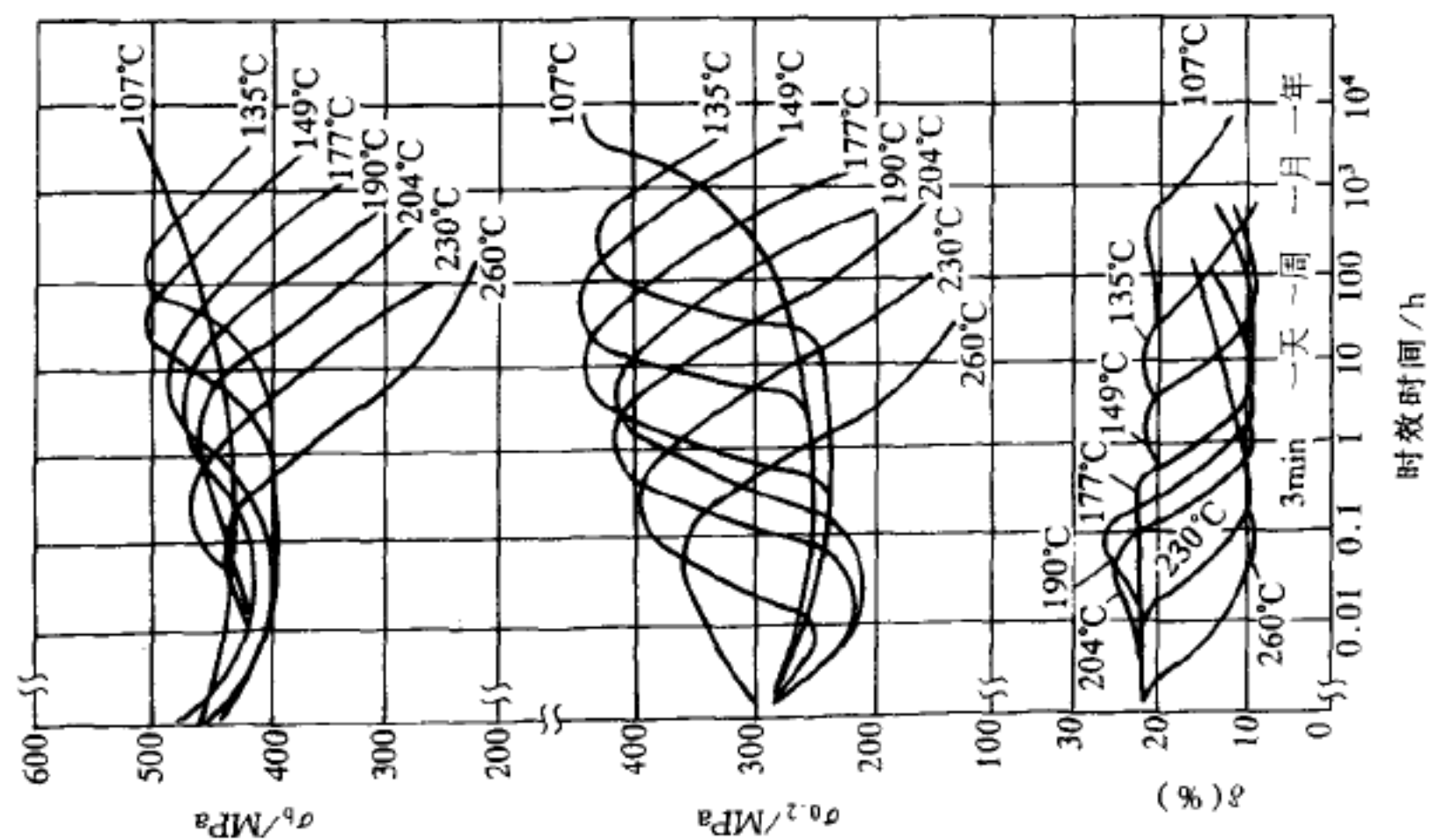


图 9-44 2A14 板材(相当于 LD10)

人工时效硬化曲线

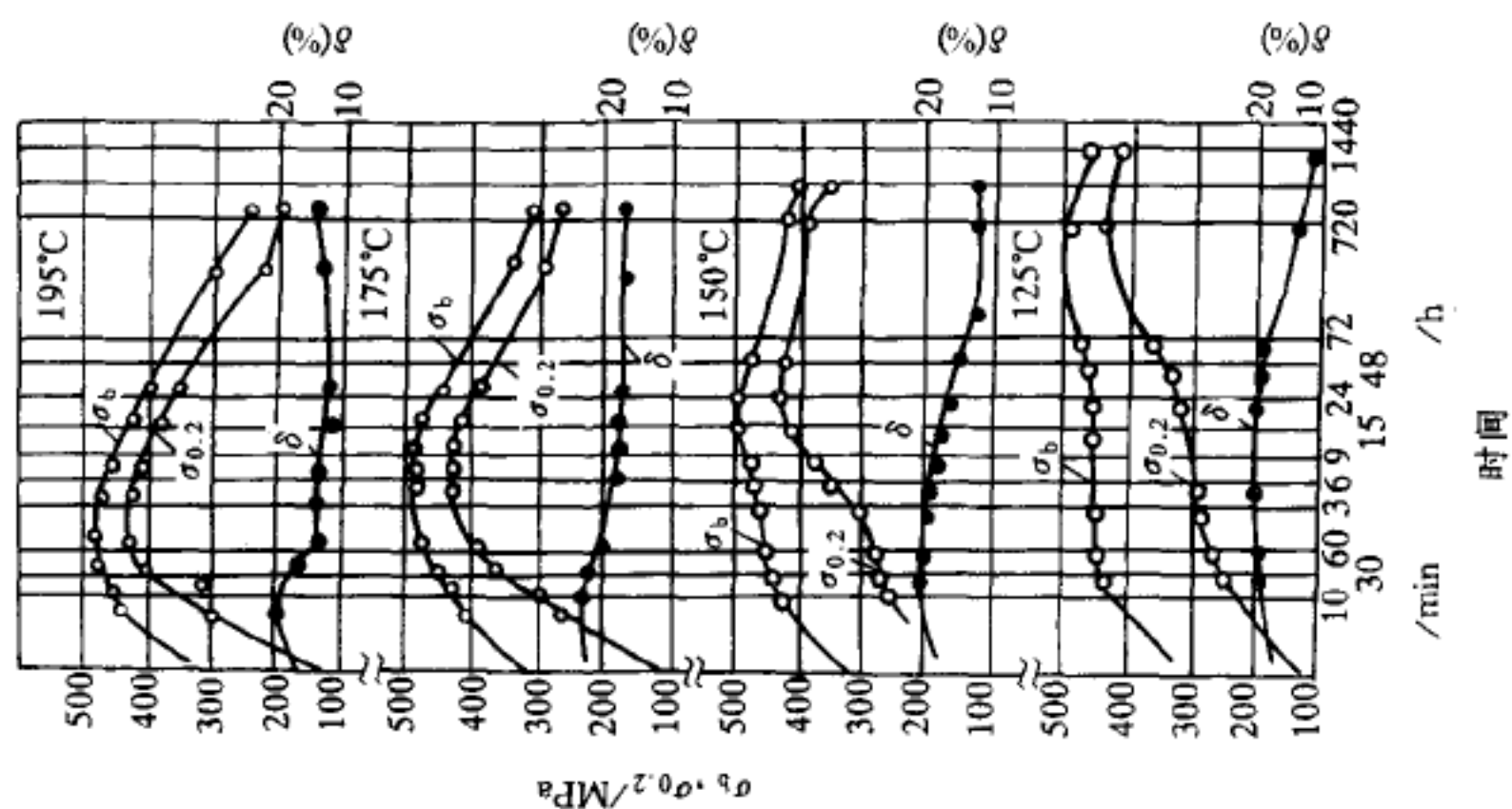


图 9-45 AK6(2A50)合金(相当于 LD5)

时效硬化曲线

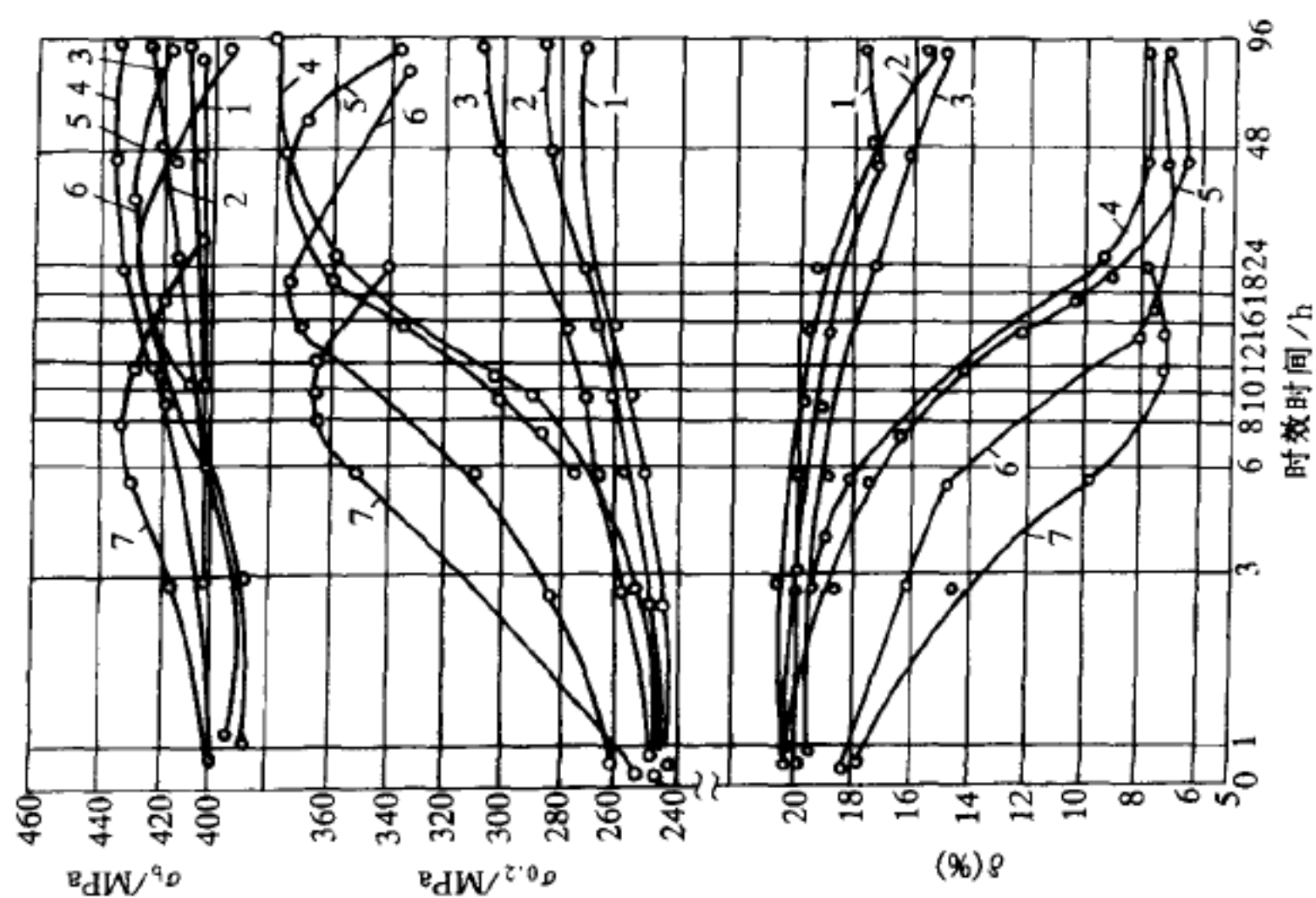


图 9-46 AK4-1(2A70)合金(相当于 LD7)

时效硬化曲线

1—150°C 2—160°C 3—170°C 4—180°C
5—190°C 6—200°C 7—210°C

表 9-84 铆钉线材铝合金热处理工艺规范

合金代号	铆钉直径 /mm	固 溶 处 理		时 效		铆接状态允许铆接时间
		温度/℃	在盐浴中保温 时间/min	温度/℃	保温时间	
2B11(LY8)	2~5 6~9.5	500±5	20 30	室温	不少于4昼夜	一般用于新淬火后2h内铆完, 亦可在自然时效4昼夜后铆接
2B12(LY9)	2~5 6~9.5	495±5	20 30	室温	不少于4昼夜	新淬火后1h之内铆完
2A12(LY10)	2~5 6~9.5	515±5	30~40 40~50	75±5	24h	淬火时效后铆接时间不限。亦 可在自然时效状态铆接
7A03(LC3)	2~5 6~9.5	470±5	30~40 40~50	分级时效 第一阶段: 100±5℃ 第二阶段: 168±5℃	3h 3h	淬火时效状态铆接时间不限
5A02(LF2)	退火:在300~400℃保温1~3h,水冷或空冷(空气循环炉加热)					铆接时间不限
5B05(LF10)	退火:在300~360℃保温1~2h,空冷(空气循环炉加热)					铆接时间不限

表 9-85 铝合金加工产品淬火前加热保温时间

加工产品	厚 度 /mm	保温时间/min	
		空气 炉	硝 盐 炉
退火包铝板	<1.2	10~12	5
	1.5~1.9	15~20	7
	2.0~4.0	20~25	10
	4.1~10	35~40	20
退火不包铝板、冷 变形管、热轧厚板、 型材、棒材、条材及 热挤套筒等	<1.2	10~20	5
	1.3~3.0	15~30	10
	3.1~5.0	20~45	15
	5.1~10	30~60	20
	11~20	35~75	25
	21~30	45~90	30
	31~50	60~120	40
	51~75	100~150	50
	76~100	120~180	70
锻件	<2.5	15~30	10
	2.6~5.0	20~45	15
	5.1~15	30~50	25
	16~30	40~60	40
	31~50	60~150	50
	51~75	150~210	60
	76~100	180~240	90~180
	101~150	210~360	120~240

表 9-86 铝合金发生过烧的危险温度

代 号	温度/℃	代 号	温度/℃
2A11(LY11)	520	7A04(LC4)、 7A09(LC9)	520
2A12(LY12)	505	2A50(LD5)、 2B50(LD6)	545
2A06(LY6)	515	2A70(LD7)、 2A80(LD8)	545
2A16(LY16)	545	2A14(LD10)	515

表 9-87 铝合金制件淬火后需及时校直的时间

合 金 牌 号	校 直 时 间
2A12(LY12)	淬火后1.5h以内
2A11(LY11)、6A02(LD2)、2A14(LD10)	淬火后2~3h以内
7A04(LC4)	淬火后4h以内

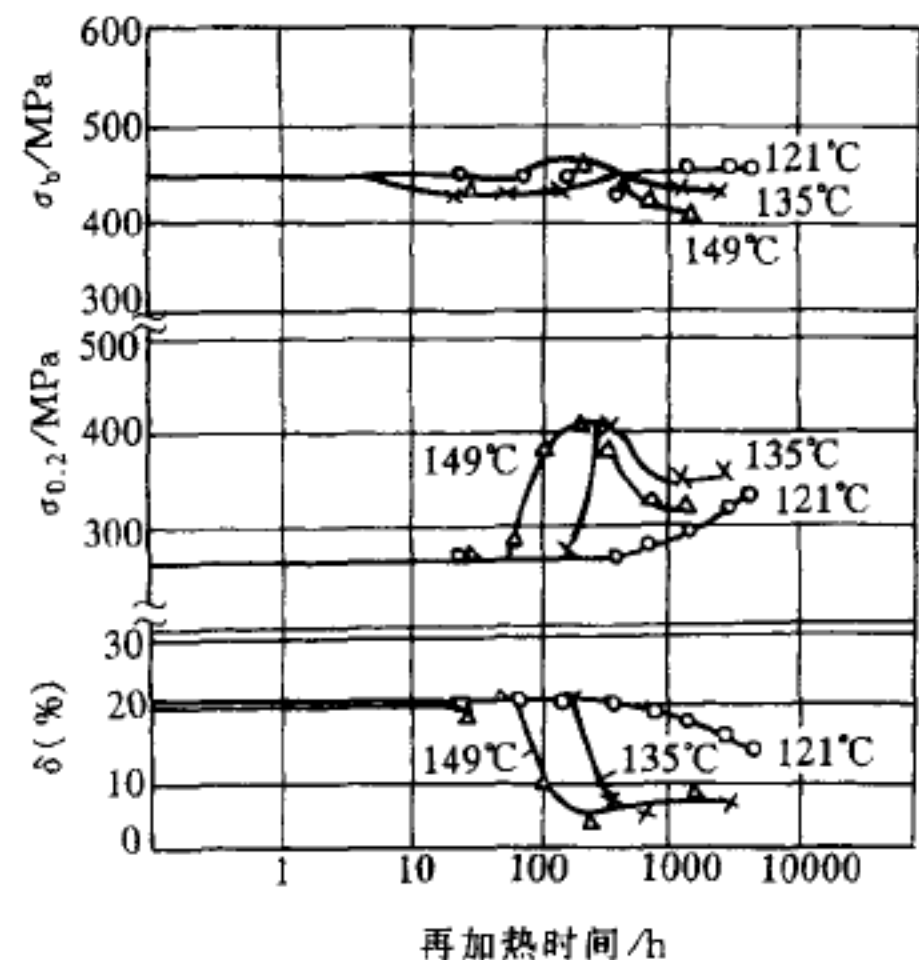


图 9-47 2A24(相当于 LY12)包铝板材淬火并均整状态在 121℃ 至 149℃ 再加热时力学性能变化曲线

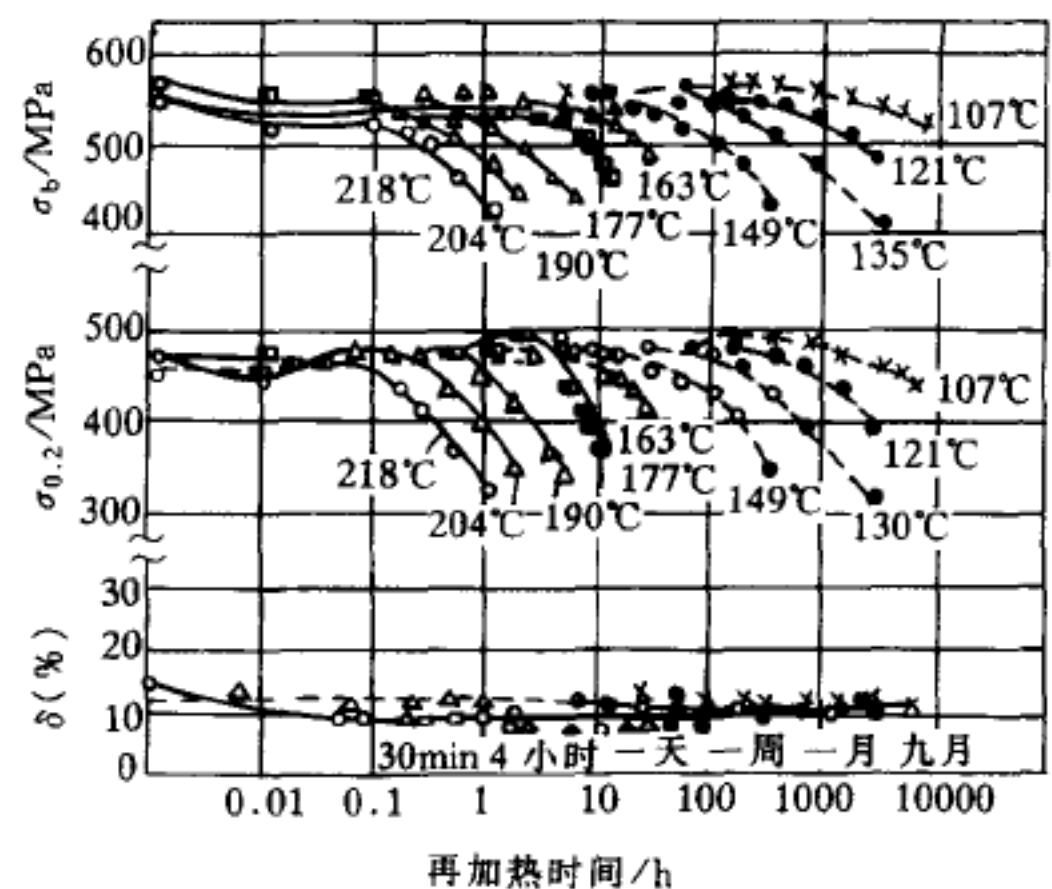


图 9-48 7A05(相当于 LC4)包铝板材人工时效状态在 107℃ 至 218℃ 再加热时的力学性能变化曲线

表 9-88 铝合金再加热工艺规范

再加热温度/℃	2A14(LD10) (人工时效状态)	2A12(LY12)(淬火+冷作硬化或均整人工时效)	6A02(LD2) (人工时效状态)	7A04(LC4) (人工时效状态)
149	20~50h	20~40h	100~200h	10~12h
163	8~10h	—	50~100h	1~2h
177	2~4h	2~4h		1~2h
190	30~60min	1h		0.5~1h
205	5~15min	30min	30min	5~10min
218	极短时间	15min	15min	极短时间
232	极短时间	5min	5min	极短时间

注:1. 表中列出的规范是当强度下降不超过5%的正常情况。

2. 2A12(LY12)和2A14(LD10)两个合金在自然时效状态下,不适于重复加热,以免降低抗腐蚀性能。

表 9-89 Al-4.5Cu-1.5Mg-0.56Mn-0.33Fe-0.14Si 合金板材经
各种形变热处理后的力学性能

热处理类型	工 艺 参 数	σ_b	$\sigma_{0.2}$	$\delta(\%)$
		/MPa		
TA ₁	A ₁ = 190℃ × 10h	486	402	14.5
THA ₁	A ₁ = 190℃ × 8h	537	529	8.1
THA ₁	A ₁ = 190℃ × 2h, H = 40%	582	562	6.6
TA ₁ HA ₂	A ₁ = 140℃ × 8h, A ₂ = 140℃ × 8h, H = 40%	609	546	11.4
TA ₁ HA ₂	A ₁ = 140℃ × 8h, A ₂ = 180℃ × 8h, H = 20%	561	518	12.6
TH ₁ A ₁ H ₂ A ₂	A ₁ = 140℃ × 12h, A ₂ = 140℃ × 20h, H ₁ = 6% , H ₂ = 20%	584	519	13.3
TA ₁ H	A ₁ = 190℃ × 10h, H = 40%	587	567	3.5

注:A₁—预时效(60~200℃);A₂—终时效,温度至少和A₁相同;H—塑性变形,压下量约10%~30%;TA₁—常规规范,单级时效;TA₁A₂—常规规范,非等温两级时效。

表 9-90 几种防锈铝去应力退火工艺规范

合 金	退火温度/℃	保温时间/min	
		厚度 < 6mm	厚度 > 6mm
5A02(LF2)	150~180	60~120	
5A03(LF3)	270~300	60~120	
3A21(LF21)	250~280	60~150	60~150

表 9-91 变形铝合金再结晶退火工艺规范^①

合 金	退火温度/℃	保温时间/min		冷却方法
		厚度 < 6mm	厚度 > 6mm ^②	
工业纯铝	350 ~ 400	热透为止	30	空冷或炉冷
3A21(LF21)	350 ~ 420 ^③	热透为止	30	空冷或炉冷
5A02(LF2)	350 ~ 400	热透为止	30	
5A03(LF3)	350 ~ 400	热透为止	30	
5A05(LF5)	310 ~ 335	热透为止	30	
5A06(LF6)	310 ~ 335	热透为止	30	
2A11(LY11)	350 ~ 370	40 ~ 60	60 ~ 90	炉冷
2A12(LY12)	350 ~ 370	40 ~ 60	60 ~ 90	
2A16(LY16)	350 ~ 370	40 ~ 60	60 ~ 90	
6A02(LD2)	350 ~ 370	40 ~ 60	60 ~ 90	炉冷
2A50(LD5)	350 ~ 400	40 ~ 60	60 ~ 90	
2B50(LD6)	350 ~ 400	40 ~ 60	60 ~ 90	
2A14(LD10)	350 ~ 370	40 ~ 60	60 ~ 90	
7A04(LC4)	370 ~ 390	40 ~ 60	60 ~ 90	炉冷

① 表中所列是在空气循环炉中加热的规范。盐浴加热,保温时间可按表中数据缩短 1/3,静止空气炉则应增加 1/2。

② 工件厚度大于 10mm 时,在硝盐槽内加热,每 mm 应增加 2min,在空气循环炉中增加 3min。

③ LF21 合金,在硝盐浴中加热时加热温度为 450 ~ 500℃。

表 9-92 变形铝合金完全退火规范

合 金	退火温度/℃	保温时间/h	冷 却 方 式
2A06(LY6)	390 ~ 420	1 ~ 2	以 30℃/h 的速度冷至 260℃,然后空冷
2A11(LY11)	390 ~ 420	1 ~ 2	
2A12(LY12)	390 ~ 420	1 ~ 2	
2A16(LY16)	390 ~ 420	1 ~ 2	
2A02(LY2)	390 ~ 420	1 ~ 2	
7A04(LC4)	390 ~ 430	1 ~ 2	以 30℃/h 的速度冷至 150℃,然后空冷

表 9-93 在不同温度下硬铝力学性能

代 号	产 品 种 类	力 学 性 能	试 验 温 度							
			- 253℃	- 196℃	- 70℃	20℃	150℃	200℃	250℃	300℃
2A11 (LY11)	锻 件 (淬火时效)	σ_b /MPa	—	550	450	410	280	150	90	50
		$\sigma_{0.2}$ /MPa	—	360	280	250	210	110	65	35
		δ (%)	—	21	19	15	16	28	45	95
2A12 (LY12)	轧制的 (淬火时效)	σ_b /MPa	700	550	470	440	380	330	220	150
		$\sigma_{0.2}$ /MPa	520	420	320	290	265	255	195	115
		δ (%)	18	24	21	19	19	11	13	13
	挤压的 (淬火时效)	σ_b /MPa	—	710	540	520	440	420	290	190
		$\sigma_{0.2}$ /MPa	—	570	390	380	—	—	—	—
		δ (%)	—	17	18	16	14	9	10	12
2A16 (LY16)	挤压的 (淬火时效)	σ_b /MPa	—	—	410	400	345	300	240	180
		$\sigma_{0.2}$ /MPa	—	—	—	250	220	210	160	130
		δ (%)	—	—	12	12	11	12	11	14

表 9-94 不同温度下超硬铝 LC4 力学性能

产品种类及状态	力学性能	试 验 温 度							
		- 253℃	- 196℃	- 70℃	20℃	100℃	150℃	200℃	250℃
锻 件 (淬火、时效)	σ_b /MPa	750	640	560	520	480	410	280	150
	$\sigma_{0.2}$ /MPa	630	520	470	440	410	350	240	120
	δ (%)	7	9	12	14	14	15	11	16
挤压产品 (淬火、时效)	σ_b /MPa	810	750	620	600	530	430	330	160
	$\sigma_{0.2}$ /MPa	730	640	560	550	500	400	310	150
	δ (%)	5	7	8	8	8	7	4	16

表 9-95 各种温度下锻铝力学性能

代 号	产品种类 及 状 态	力学性能	试 验 温 度							
			- 253℃	- 196℃	- 70℃	20℃	150℃	200℃	250℃	300℃
7A10 (LC10)	轧 制 CS	σ_b /MPa	640	540	470	440	330	310	200	70
		$\sigma_{0.2}$ /MPa	520	440	410	380	280	250	170	—
		δ (%)	17	14	11	9	10	12	12	30
	挤 压 CS	σ_b /MPa	730	610	510	490	410	340	230	—
		$\sigma_{0.2}$ /MPa	590	530	460	450	370	310	220	—
		δ (%)	14	10	8	7	14	13	14	—
2A70 (LD7)	轧 制 CS	σ_b /MPa	—	510	430	400	350	310	240	—
		$\sigma_{0.2}$ /MPa	—	400	360	350	330	260	190	—
		δ (%)	—	11	10	8	9	14	19	—
	挤 压 CS	σ_b /MPa	—	500	440	420	360	320	250	—
		$\sigma_{0.2}$ /MPa	—	440	400	360	330	290	230	—
		δ (%)	—	12	9	7	7	10	11	—

表 9-96 锻铝合金的分类和特点

类别	合金元素作用	性能	热处理
Al-Mg-Si 和 Al-Mg-Si-Cu	Mg 和 Si 形成 Mg_2Si 相有时效强化效果,但 $Mg/Si < 1.73$ 。加 Mn 或 Cr 可提高强度耐蚀性和韧性、Fe 作为杂质应在 0.2% ~ 0.4% 范围,可防止晶粒长大,过高会降低强度。Cu 可提高强度,但降低耐蚀性	对应力腐蚀不敏感,焊接性好,焊后耐蚀性不变	固溶处理后立即人工时效
Al-Cu-Mg-Fe-Ni	Fe、Ni 同时加入 1% ~ 1.5% 形成 $FeNiAl_3$ 相,阻碍高温形变,可提高高温强度, Mg 和 Si 形成 Mg_2Si 有时效强化作用	高温强度高,导热性好,热胀系数小,易锻造成形	固溶人工时效

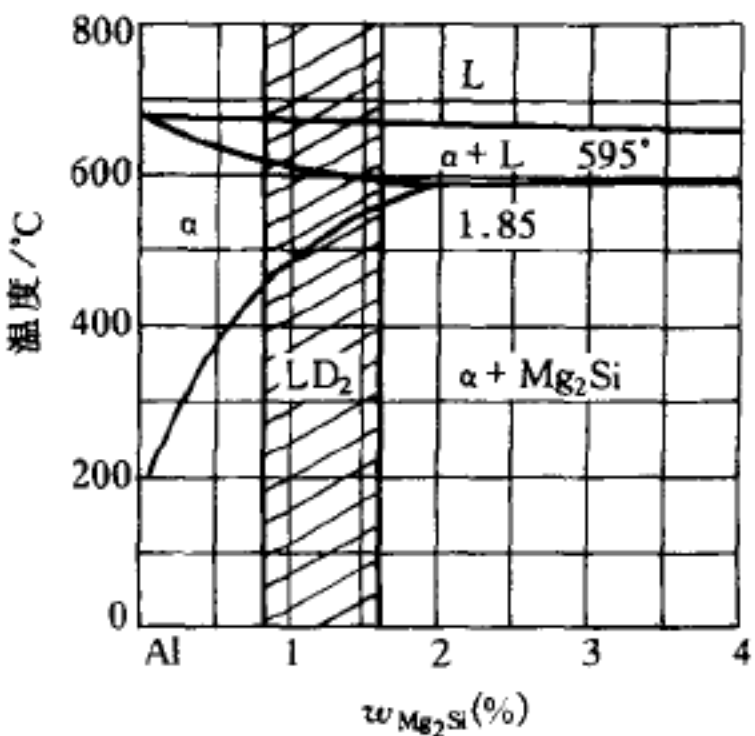


图 9-49 Al- Mg_2Si 伪二元相图

表 9-97 锻铝主要特点和用途举例

代号	产品种类	主 要 特 点	用 途 举 例
6A02 (LD2)	锻件、棒、板、管、型	退火及热状态下有高的塑性,易于锻造,淬火自然时效后塑性尚可,自然时效状态下耐蚀性能与 3A21、5A02(LF21、LF2)相似,人工时效状态有晶间腐蚀倾向,退火状态可加工性不佳,淬火时效状态可加工性尚可,易于点焊和氢原子焊,气焊尚可	要求有高塑性和高耐蚀性的机械零件,建筑结构及复杂锻件和模锻件
2A50 (LD5)	锻件、棒	热状态下有高的塑性,有挤压效应,纵向和横向性能区别较大,耐蚀性较好,但有晶间腐蚀倾向,可加工性、接触焊、点焊和滚焊性能较好,电弧焊和气焊性能不佳	形状复杂中等强度的锻件及模锻件
2B50 (LD6)	锻件	热状态下有比 2A50(LD5)还高的塑性,可热处理强化,耐蚀性能、可加工性能及焊接性能与 2A50(LD5)相似	形状复杂的锻件和模锻件,如压气机轮和风扇叶轮
2A70 (LD7)	锻件、棒、板	热状态下有高的塑性,可热处理强化,高温强度高,无挤压效应,接触焊、点焊和滚焊性能较好,电弧焊和气焊性能差	内燃机活塞和在高温下工作的复杂锻件,板材可作高温下工作的结构件
2A14 (LD10)	锻件、棒	热状态下塑性尚可,有高的强度和良好的可加工性能,接触焊、点焊和滚焊性能较好,电弧焊和气焊性能差,可热处理强化,有挤压效应,纵向和横向性能有差别,耐蚀性能不高	承受重载荷的锻件和模锻件,如接头

表 9-98 铝锡轴承合金化学成分和硬度

序号	化 学 成 分 (质量分数) (%)								
	Sn	Cu	Ni	Mg	Mn	Fe	Si	Al	HV
1	6.0 ~ 9.0	2.0 ~ 3.0	< 1.5	< 1.0			其他 < 0.2	余量	45 ~ 55
2	10.0 ~ 13.0	0.5 ~ 1.0	< 1.0	< 0.5			其他 < 0.2	余量	30 ~ 40
3	17.5 ~ 22.5	0.75 ~ 1.25			< 0.7	< 0.7	< 0.7	余量	25 ~ 35

表 9-99 铝锡 ($w_{\text{Sn}} 17.5\% \sim 22.5\%$) 轴承合金性能和使用条件

与钢的结合强度 /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	HB		线胀系数 α (20 ~ 150℃) / $\times 10^{-5} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	最大允许载荷 P /MPa	允许滑动速度 $v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	最高工作温度 /℃	配用轴颈 最低硬度 HBW
		20℃	150℃					
60 ~ 95	60 ~ 100	25 ~ 35	20 ~ 30	2.2	3000	< 15	170	230

表 9-100 超硬铝主要特点及用途举例

代号	产品种类	主 要 特 点	用 途 举 例
7A03 (LC3)	线	淬火人工时效状态可以铆接,可热处理强化,常温抗剪强度较高,耐蚀性和可加工性尚可,铆钉铆接时,不受热处理后时间限制	承力结构的铆钉,工作温度在 125℃ 以下,可做 2A10(LY10)铆钉合金代用品
7A04 (LC4)	板、棒、管、型、锻件	强度高,刚淬火和退火状态下塑性尚可,可热处理强化,淬火人工时效状态下使用,点焊焊接性能较好,气焊不良,热处理后可加工性尚可	结构中主要受力件:如飞机大梁、桁条、加强框、蒙皮、接头及起落架

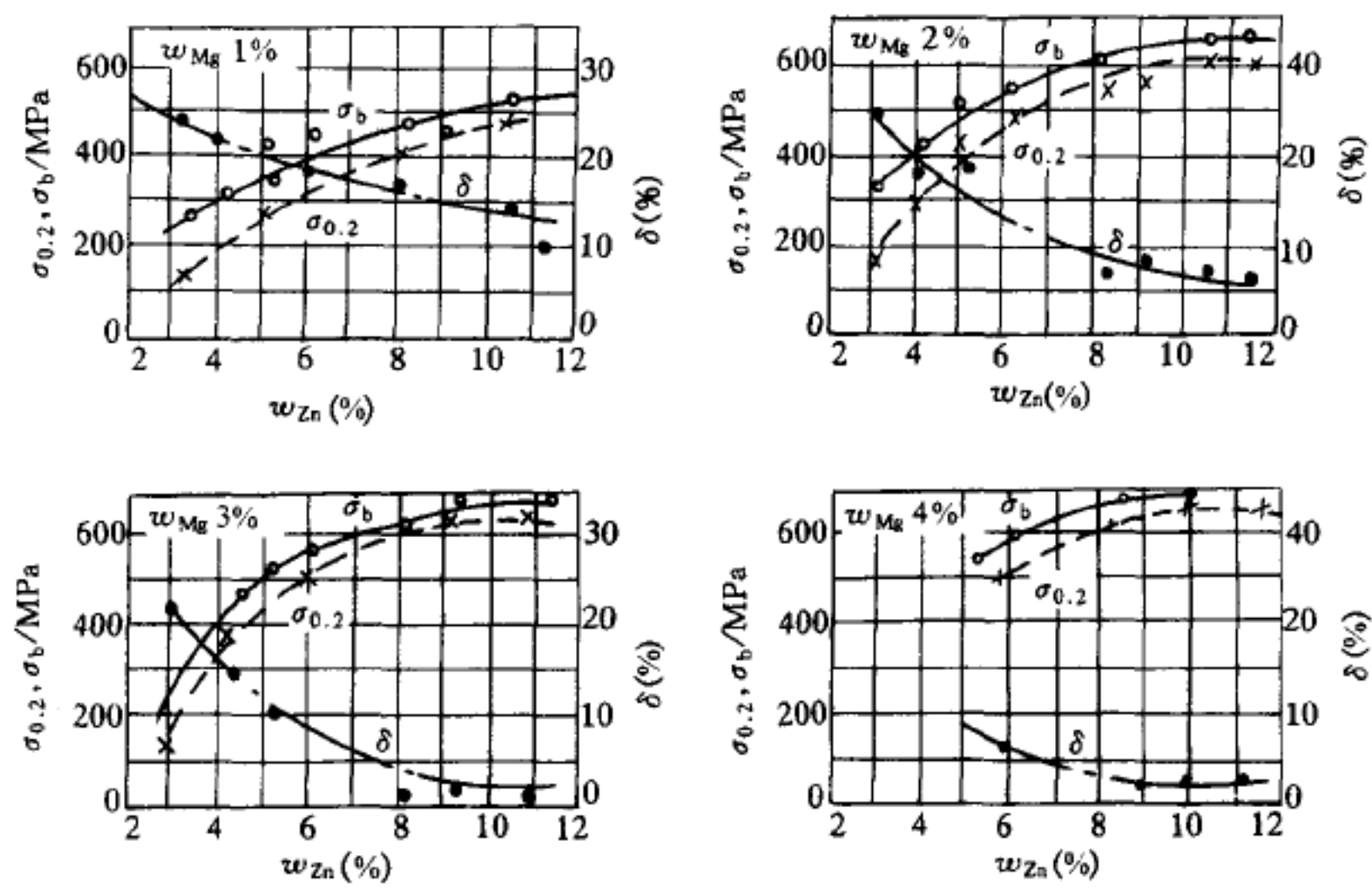


图 9-50 铝锌镁合金力学性能

表 9-101 铝锌镁可焊铝合金化学成分和力学性能

主要化学成分(质量分数)(%)								力学性能		
合金	Zn	Mg	Mn	Cr	Zr	Ti	Cu	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ (%)
AlZn4.1Mg1.8	3.8 ~ 4.4	1.6 ~ 2.1	0.2 ~ 0.5	0.07 ~ 0.12	0.13 ~ 0.20	—	0.1 ~ 0.2	350	280	12
AlZn4.6Mg1.4	4.2 ~ 5.0	1.0 ~ 1.8	0.2 ~ 0.7	0.06 ~ 0.2	0.06 ~ 0.20	0.01 ~ 0.06	—	400	335	14
AlZn4Mg2.8	3.5 ~ 4.5	2.3 ~ 3.3	0.1 ~ 0.4	0.15 ~ 0.25	—	0.1	—	425	355	14
AlZn4.5Mg1.2	4.0 ~ 5.0	1.0 ~ 1.4	0.1 ~ 0.5	0.1 ~ 0.25	—	0.01 ~ 0.1	—	360	280	12

表 9-102 铝及其合金热处理工艺参数

代 号	退 火 ^①		淬火温度/℃	时 效	
	温度/℃	时间/h		温 度 /℃	时 间 /h
1070A(L1 ~ L3)	350 ~ 500	壁厚小于 6mm, 热透即可, 壁厚大于 6mm, 保温 30min	—	—	—
3A21(LF21)	350 ~ 500		—	—	—
5A02、5A03(LF2、LF3)	350 ~ 420		—	—	—
5A05、5A06(LF5、LF6)	310 ~ 335		—	—	—
2A01(LY1)	370 ~ 450	2 ~ 3	495 ~ 505	室 温	96
2A02(LY2)	370 ~ 450		495 ~ 505	165 ~ 175	16
2A06(LY6)	380 ~ 430		500 ~ 510	室温或 125 ~ 135	120 或 12 ~ 14
2A10(LY10)	370 ~ 450		515 ~ 520	70 ~ 80	24
2A11(LY11)	390 ~ 450		500 ~ 510	室 温	96
2A12(LY12)	390 ~ 450		495 ~ 503	室温或 185 ~ 195	96 或 6 ~ 12
2A16(LY16)	390 ~ 450		530 ~ 540	160 ~ 170	16
2A17(LY17)	390 ~ 450		520 ~ 530	180 ~ 190	16

(续)

代 号	退 火 ^①		淬火温度/℃	时 效	
	温度/℃	时间/h		温 度 /℃	时 间 /h
7A03(LC3)	350 ~ 370	2 ~ 3	460 ~ 470	分级时效 1 级 115 ~ 125	3 ~ 4
7A04(LC4)	390 ~ 430		465 ~ 480	2 级 160 ~ 170	3 ~ 5
				120 ~ 140	12 ~ 24
LC5	390 ~ 430		465 ~ 475	分级时效 1 级 115 ~ 125	3
				2 级 155 ~ 165	3
				135 ~ 145	16
		分级时效 1 级 95 ~ 105		4 ~ 5	
2 级 155 ~ 165	8 ~ 9				
6A02(LD2)	380 ~ 420	2 ~ 3	515 ~ 530	150 ~ 165 或室温	6 ~ 15 或 96
2A50、2B50(LD5、LD6)	350 ~ 400		505 ~ 520	150 ~ 165 或室温	6 ~ 15 或 96
2A14(LD10)	390 ~ 410		495 ~ 505	150 ~ 165 或室温	5 ~ 15 或 96
2A70(LD7)	350 ~ 480		525 ~ 540	185 ~ 195 或稳定化处理 240	8 ~ 12 或 1 ~ 3
2A80(LD8)	350 ~ 480		525 ~ 535	165 ~ 180 或稳定化处理 240	8 ~ 14 或 1 ~ 3
2A90(LD9)	350 ~ 480		510 ~ 520	165 ~ 175 或稳定化处理 225	6 ~ 16 或 3 ~ 10

① 不能热处理强化的铝及铝合金,不受冷却速度限制,可直接在空气或水中冷却。能热处理强化的铝合金,以 30℃/h 的冷却速度,冷却到 250℃ 以下出炉,于空气中继续冷却。

表 9-103 铝及其合金加工产品工艺性能

代号和状态		抗应力 腐蚀裂 纹倾向	冷变形 能力	可加 工性	焊 接 性 能			代号和 状态	抗应力 腐蚀裂 纹倾向	冷变形 能力	可加 工性	焊 接 性 能		
					气焊	电弧 焊	电阻点焊 和缝焊					气焊	电弧 焊	电阻点焊 和缝焊
1060(L2)	M	优	优	劣	优	优	良	LD10	M	—	—	差	差	良
	Y	优	良	差	优	优	优		CZ	中	中	良	良	良
2A01(LY1)	CZ	优	良	中	差	良	良	LD2	M	优	优	差	优	良
2A11(LY11)	CZ	中	中	良	差	良	良		CZ	良	良	中	优	优
2A12(LY12)	M	—	—	差	差	差	差	LC4	M	—	—	差	差	良
	CZ	中	中	良	中	良	良		CS	中	差	良	中	良
2A16(LY16)CYS	—	—	—	—	差	优	良	LF21	M	优	优	劣	优	优
	M ^①	—	差	良	优	优	优		Y	优	中	差	优	优
2A70(LD7)	CS	中	—	良	差	中	良	LF3	M	优	优	差	中	优

① 淬火冷变形人工时效。

表 9-104 铝合金物理性能

代号	密度 ρ /g·cm ⁻³	热导率 λ (25℃) /×4.2W·(m·K) ⁻¹	比热容 c (100℃) /×4.2J·(g·K) ⁻¹	线胀系数 α (20 ~ 100℃) /×10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹	电阻率 ρ (20℃) /×10 ⁻² Ω·mm ² ·m ⁻¹
3A21(LF21)	2.73	0.43	0.26	23.2	3.45
5A02(LF2)	2.68	0.37	0.23	24.2	4.76
5A03(LF3)	2.67	0.35	0.21	23.5	4.96
5A06(LF6)	2.64	0.28	0.22	23.7	6.73
2A01(LY1)	2.76	0.39	0.22	23.4	3.90

(续)

代号	密度 ρ $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	热导率 λ (25℃) $/\times 4.2\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	比热容 c (100℃) $/\times 4.2\text{J}\cdot(\text{g}\cdot\text{K})^{-1}$	线胀系数 α (20~100℃) $/\times 10^{-6}\cdot\text{℃}^{-1}$	电阻率 ρ (20℃) $/\times 10^{-2}\Omega\cdot\text{mm}^2\cdot\text{m}^{-1}$
2A10(LY10)	2.80	0.35	0.23		5.04
2A11(LY11)	2.80	0.28	0.22	22.9	5.40
2A12(LY12)	2.78	0.28	0.22	22.7	5.70
2A02(LY2)	2.75	0.32	0.20	23.6	5.50
2A06(LY6)	2.76		0.21		6.10
2A16(LY16)	2.84	0.33	0.21	22.6	6.10
7A03(LC3)	2.85	0.38		21.9	4.4
7A04(LC4)	2.85	0.38		23.1	4.2
6A02(LD2)	2.7	0.42	0.19	23.5	3.7
2A50(LD5)	2.75	0.42	0.20	21.4	4.1
2B50(LD6)	2.75	0.39	0.20	21.4	4.3
2A14(LD10)	2.8	0.38	0.20	22.5	4.3
2A70(LD7)	2.8	0.34	0.19	19.6	5.5
2A80(LD8)	2.77	0.35	0.20	21.8	5.0

表 9-105 铝在各种介质中耐蚀性比较

耐 蚀	一般耐蚀	不耐蚀
大气、石油类、液体空气、浓硝酸、浓醋酸、硫酸、酒精、丙酮、乙醛、硫、二甲苯、甘油、甲苯、苯、牛乳、肉类	亚硝酸、氨、海水、蚁酸、果汁、混凝土、石灰水、骨胶、尿	亚硫酸、墨水、氟、氯、溴、碘、盐酸、氟氢酸、磷酸、稀醋酸、碱、稀硫酸、食盐

表 9-106 铝及其合金耐海水腐蚀性比较

铝 及 其 合 金	耐 蚀 情 况
纯铝 ($w_{\text{Al}}99.98\%$) Al-Mg 合金 Al-Mn 合金 Al-Mg-Mn 合金	优
纯铝 ($w_{\text{Al}}99.5\%$)	良
Al-Mg-Si 合金	中
Al-Si 合金 Al-Zn-Mg 合金	差
Al-Zn-Mg-Cu 合金 Al-Cu-Mg 合金	劣

表 9-107 铸造铝合金中主要合金相的热处理效果

合金系	合金代号	主要合金相	结晶时合金相的形成条件	在固溶温度下溶于固溶体的程度	自然时效强化效果	人工时效强化效果
Al-Si	ZL102	Si	在任何结晶速度下	溶解 1.5%	无	很微
Al-Si-M2	ZL109	Si	在任何结晶速度下	0.2%	无	无
		Mg ₂ Si	在较慢结晶过程中(砂型和金属型)	完全溶解	很微	很大
Al-Si-Mg-Mn	ZL104	Si	在任何结晶速度下	溶解 < 0.5%	无	无
		Mg ₂ Si	在不大的结晶速度下	完全溶解	很微	很大
		AlSiMnFe	在不大的结晶速度下	实际不溶	无	无
Al-Si-Cu-Mg	ZL105	Si	在任何结晶速度下	少量 < 0.3%	无	无
		CuAl ₂	Mg 量上限, Cu 量上限	全部溶解	很小	极大
		Mg ₂ Si	当 Mg 不全部在 W 相时	全部溶解	微弱	极大
		W	缓慢结晶时, Si、Cu、Mg 量能满足时	部分溶解	无	甚微

(续)

合金系	合金代号	主要合金相	结晶时合金相的形成条件	在固溶温度下溶于固溶体的程度	自然时效强化效果	人工时效强化效果
Al-Cu	ZL203	CuAl ₂	任何结晶速度下	全部溶解	不大	极大
	ZL202	CuAl ₂	任何结晶速度下	溶解后有多余	实际无影响	不显著
Al-Cu-Mn-Ti	ZL201	CuAl ₂	任何结晶速度下	全部溶解	有影响	极大
		T(Al ₁₇ Mn ₂ Cu)	任何结晶速度下	析出新的 T 相	无	微弱
Al-Mg	ZL301	β(Mg ₂ Al ₃)	在不大的结晶速度下(砂型和金属型)	全部溶解	无	不要求 β 相析出
Al-Zn-Si-Mg	ZL401	Si	任何结晶速度下	不溶	无	无
		Zn	在很缓慢的结晶条件下	溶解	甚微	显著

注:1. 表中列出除 α 相外的主要强化相。

2. W 相为 Al₃Mg₂Cu₄Si₄。表 9-108 各国铸造铝合金牌号对照^①

中国	欧 共 体			ISO	日 本	俄罗斯	美 国
	德 国	法 国	英 国				
ZLD101	GB-AlSi7Mg	A-S7G-03	LM25	AlSi7Mg	AC4C.4	AJ19	356.1
ZLD102	GB-AlSi12	A-S13	LM6	AlSi12	AC3A.2	AJ12	A413.1
ZLD103			LM22	AlSi5Cu3	AC4D.1	AJ13	363.1
ZLD104	GB-AlSi10Mg	A-S9G	LM9	AlSi10Mg		AJ14	360.2
ZLD105			LM16	AlSi5Cu1Mg		AJ15	355.1
ZLD106						AJ132	328.1
ZLD107	GB-AlSi6Cu4		LM21	AlSi6Cu4			380.2
ZLD108						AJ125	339.1
ZLD109			LM13	AlSi12Cu		AJ130	332.1
ZLD110			LM12			AJ110B	
ZLD203						AJ1	295.2
ZLD301	GB-AlSi10Mg	AG10Y4				AJ127	520.2

① 相应牌号只是指化学成分接近,并不是完全相同。

表 9-109 各国变形铝及铝合金牌号对照

中国牌号	国际 牌号	ISO 牌号	EN 牌号(ENAW)		JIS 牌号	ГОСТ 牌号
			数字型	化学元素符号型		
1A99	1199	—	1199	Al99.99	1N99	АДОЧ
1A99	1090	—	1090	Al99.90	1N90	—
1080	1080	Al99.8			1080	АД000
1080A	1080A	Al99.8(A)	1080A	Al99.8(A)		
1070	1070				1070	АД00
1070A	1070A	Al99.7	1070A	Al99.7		
1370	1370	E-Al99.7	1370	EAl99.7		

(续)

中国牌号	国际 牌号	ISO 牌号	EN 牌号 (ENAW)		JIS 牌号	ГОСТ 牌号
			数字型	化学元素符号型		
1060、1A60	1060	Al99.6	1060	Al99.6	1060	—
1050、1A50 1050A 1350	1050 1050A 1350	Al99.5 E-Al99.5	1050A 1350	Al99.5 EAl99.5	1050	АД0、 АД0Е
1145、1A45	1145	—	—	—	—	—
1035 1235、1A35	1035 1235	—	1235	Al99.35	—	—
1A30	1230	—	—	—	—	АД1
1200 1100	1200 1100	Al99.0 Al99.0Cu	1200 1100	Al99.0 Al99.0Cu	1200 1100	АДС
2004	2004	—	—	—	—	—
2A50、2B50	2006	—	—	—	—	—
2011	2011	AlCu6BiPb	2011	AlCu6BiPb	2011	—
2014、2A14 2014A 2214	2014 2014A 2214	AlCu4SiMg AlCu4SiMg(A)	2014 2014A 2214	AlCu4SiMg AlCu4SiMg(A) AlCu4SiMg(B)	2014	AK8
2017、2A11、2B11 2017A 2117、2A01	2017 2017A 2117	AlCu4MgSi AlCu4MgSi(A) AlCu2.5Mg	2017A 2117	AlCu4MgSi(A) AlCu2.5Mg	2017 2117	Д1 Д1П
2A21、2A90 2218 2618、2A70、2B70	2018 2218 2618	AlCu2MgNi	2618A	AlCu2Mg1.5Ni	2018 2218 2618	AK4
2219 2A16、2B16、2A20	2219 2319	AlCu6Mn	2219 2319	AlCu6Mn AlCu6Mn(A)	2219	—
2024、2A12、 2B12、2A06 2124 2A25	2024 2124 2524	AlCu4Mg1	2024 2124	AlCu4Mg1 AlCu4Mg1(A)	2024	Д16 Д16П
3003、3A21 3103	3003 3103	AlMn1Cu AlMn1	3003 3103	AlMn1Cu AlMn1	3003	AMЦ
3004 3104	3004 3104	AlMn1Mg1 AlMn1Mg1Cu	3004 3104	AlMn1Mg1 AlMn1Mg1Cu	3004	—
3005 3105	3005 3105	AlMn1Mg0.5 AlMn0.5Mg0.5	3005 3105	AlMn1Mg0.5 AlMn0.5Mg0.5	3005 3105	—
4004	4004	—	4004	AlSi10Mg1.5	—	—
4032、4A11	4032	—	4032	AlSi12.5MgCuNi	4032	—

(续)

中国牌号	国际 牌号	ISO 牌号	EN 牌号(ENAW)		JIS 牌号	ГОСТ 牌号
			数字型	化学元素符号型		
4043、4A01 4A13	4043 4343	AlSi5	4043A 4343	AlSi5(A) AlSi7.5	4043	—
4047、4A17 4047A	4047 4047A	AlSi12 AlSi12(A)	4047A	AlSi12(A)	4047	—
5005	5005	AlMg1(B)	5005	AlMg1(B)	5005	AMГ1
5019	5019	AlMg5	5019	AlMg5	—	AMГ5Π
5042	5042	—	5042	AlMg3.5Mn	—	—
5050	5050	AlMg1.5(C)	5050	AlMg1.5(C)	—	—
5A66 5251	5051A 5251	AlMg2	5051A 5251	AlMg2(B) AlMg2	—	AMГ2
5052、5A02	5052	AlMg2.5	5052	AlMg2.5	5052	—
5154、5A03 5154A 5454 5554 5754	5154 5154A 5454 5554 5754	AlMg3.5 AlMg3.5(A) AlMg3Mn AlMg3Mn(A) AlMg3	5154(A) 5454 5554 5754	AlMg3.5(A) AlMg3Mn AlMg3Mn(A) AlMg3	5154 5454	AMГ3
5056 5456、5A05、5B05 5A30	5056 5456 5556	AlMg5Cr AlMg5Mn1	5056A 5456A 5556A	AlMg5 AlMg5Mn1(A) AlMg5Mn	5056	AMГ5
5A43	5357	—	—	—	—	—
5082 5182	5082 5182	—	5082 5182	AlMg4.5 AlMg4.5Mn0.4	5082 5182	—
5083 5183	5083 5183	AlMg4.5Mn0.7 AlMg4.5Mn0.7(A)	5083 5183	AlMg4.5Mn0.7 AlMg4.5Mn0.7(A)	5083	AMГ4.5
5086	5086	AlMg4	5086	AlMg4	5086	—
6101 6101A	6101 6101A	E-AlMgSi E-AlMgSi(A)	6101 6101A	E-AlMgSi E-AlMgSi(A)	—	—
6005 6005A	6005 6005A	AlSiMg AlSiMg(A)	6005 6005A	AlSiMg AlSiMg(A)	—	—
6A10	6110A	—	—	—	—	—
6A02、6B02 6351	6151 6351	AlSiMg0.5Mn	6351	AlSiMg0.5Mn	6151	AB
6060	6060	AlMgSi	6060	AlMgSi	—	—
6061	6061	AlMg1SiCu	6061	AlMg1SiCu	6061	АД33
6063 6063A	6063 6063A	AlMg0.7Si AlMg0.7Si(A)	6063 6063A	AlMg0.7Si AlMg0.7Si(A)	6063	АД31
6070	6070	—	—	—	—	—

(续)

中国牌号	国际 牌号	ISO 牌号	EN 牌号(ENAW)		JIS 牌号	ГОСТ 牌号
			数字型	化学元素符号型		
6181	6181	AlSi1Mg0.8	6181	AlSi1Mg0.8	—	—
6082	6082	AlSi1MgMn	6082	AlSi1MgMn	—	АД35
7003	7003	—	7003	AlZn6Mg0.8Zr	—	—
7005、7A05	7005	AlZn4.5Mg1.5Mn	7005	AlZn4.5Mg1.5Mn	—	—
7A04	7010	—	7010	AlZn6MgCu	—	—
7A52	7017	—	—	—	—	—
7020	7020	AlZn4.5Mg1	7020	AlZn4.5Mg1	—	1925C
7022	7022	—	7022	AlZn5Mg3Cu	—	—
7A15	7023	—	—	—	—	—
7A19	7028	—	—	—	—	—
7A31	7039	—	7039	AlZn4Mg3	—	—
7050	7050	AlZn6CuMgZr	7050	AlZn6CuMgZr	7050	—
7A01	7072	—	7072	AlZn1	7072	АЦПЛ
7075、7A09	7075	AlZn5.5MgCu	7075	AlZn5.5MgCu	7075	B95
7475	7475	AlZn5.5MgCu(A)	7475	AlZn5.5MgCu(A)		
8011	8011	—	8011A	AlFeSi(A)	—	—
8090	8090	—	8090	AlLi2.5Cu1.5Mg	—	—

表 9-110 美国变形铝合金加工及热处理状态标记法

代 号	说 明
F	原加工状态。指变形合金而言,是对力学性能不作严格要求的最初加工状态,如热轧、挤压状态
O	退火再结晶状态
W	固溶处理,不稳定处理状态
H	冷作硬化状态
T	固溶处理后时效。在 T 字后面的第一位数字表示热处理基本类型(从 1 ~ 10),其后面各位数字表示在热处理细节方面有所变化
T1	从成形温度冷却并自然时效至大体稳定状态
T2	退火状态(只用于铸件)
T3	固溶处理,冷作后自然时效
T31	固溶处理冷作(1%)后自然时效
T36	固溶处理冷作(6%)后自然时效
T37	固溶处理冷作(7%)后自然时效,用于 2219 合金
T4	固溶处理后自然时效
T41	固溶处理后沸水淬火
T411	固溶处理后空冷至室温,硬度在 O 与 T6 之间,残余应力低
T42	固溶处理后自然时效。由用户进行处理,适用于 2024 合金,强度比 T4 稍低
T5	从成形温度冷却后人工时效

(续)

代 号	说 明
T6	固溶处理后人工时效
T61	T41 + 人工时效
T611	固溶处理,沸水淬火
T62	固溶处理后人工时效
T7	固溶处理后稳定化。提高尺寸稳定,减小残余应力,提高抗蚀性
T72	固溶处理后过时效
T73	固溶处理后进行分级时效,强度比 T6 低,抗蚀性显著提高
T76	固溶处理后进行分级时效
T8	固溶处理冷作后人工时效
T81	固溶处理后冷作,人工时效。为改善固溶处理后的变形及提高强度
T86	固溶处理后冷作(6%),人工时效
T87	T37 + 人工时效
T9	固溶处理后人工时效再冷作
T10	从成形温度冷却,人工时效后冷作
TX51	为消除固溶处理后的残余应力进行拉伸处理。板材 0.5% ~ 3% 的永久变形,棒、型材 1% ~ 3% 的永久变形。X 代表 3、4、6 或 8,例如 T351、T451、T651、T851,适用于板、拉制棒、线材、拉伸消除应力后不作任何矫正而时效。T3510、T4510、T8510,适用于挤压型材,拉伸消除应力后为使平直度符合公差进行矫正,并时效
TX52	为消除固溶处理后的残余应力进行压缩变形。固溶处理后进行 2.5% 的塑性变形然后时效,例如 T352、T652
TX53	消除热应力
TX54	为消除精密锻件固溶处理后的残余应力而进行的压缩变形

9.3 钛合金的热处理及性能(表 9-111 ~ 表 9-131,图 9-51 和图 9-52)

表 9-111 α 钛合金的化学成分

牌号	代学元素(质量分数)(%)				杂质(不大于)(质量分数)(%)					
	Al	Sn	Cu	Zr	Fe	Si	C	N	H	O
TA4	2.0 ~ 3.5	—	—	—	0.30	0.05	0.10	0.05	0.015	0.15
TA5	3.3 ~ 4.7	—	—	0.005B	0.30	0.15	0.10	0.04	0.015	0.15
TA6	4.0 ~ 5.5	—	—	—	0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.15
TA7	4.0 ~ 6.0	2.0 ~ 3.0	—	—	0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.20
TA8	4.5 ~ 5.5	2.0 ~ 3.0	2.5 ~ 3.2	1.0 ~ 1.5	0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.15

表 9-112 $\alpha + \beta$ 钛合金的牌号和主要成分

牌号	代 号	主要成分(质量分数)(%)							
		Al	Cr	Mo	Sn	Mn	V	Fe	Si
TC1	Ti—2Al—1.5Mn	1.0 ~ 2.5	—	—	—	0.7 ~ 2.0	—	—	—
TC2	Ti—3Al—1.5Mn	3.5 ~ 5.0	—	—	—	0.8 ~ 2.0	—	—	—
TC3	Ti—5Al—4V	4.5 ~ 6.0	—	—	—	—	3.5 ~ 4.5	—	—
TC4	Ti—6Al—4V	5.5 ~ 6.8	—	—	—	—	3.5 ~ 4.5	—	—

(续)

牌号	代 号	主要成分(质量分数)(%)							
		Al	Cr	Mo	Sn	Mn	V	Fe	Si
TC10	Ti—6Al—6V—2Sn—0.5Cu—0.5Fe	5.5~6.5	—	—	1.5~2.5	—	5.5~6.5	0.35~1.0	Cu 0.35~1.0
TC6	Ti—6Al—1.5Cr—2.5Mo—0.5Fe—0.3Si	5.6~7.0	0.8~2.3	2.0~3.0	—	—	—	0.2~0.7	0.15~6.40
TC7	Ti—6Al—0.6Cr—0.4Fe—0.4Si—0.01B	5.0~6.5	0.4~0.9	—	—	—	—	0.25~0.60	0.25~0.60
TC9	Ti—6.5Al—3.5Mo—2.5Sn—0.3Si	5.8~6.8	—	2.8~3.8	1.8~2.8 (或 Zr)	—	—	—	0.2~0.4

表 9-113 β 钛合金的化学成分

牌号	化学成分(质量分数)(%)				杂质(质量分数)(%)(不大于)					
	Al	Cr	Mo	V	Fe	Si	C	N	H	O
TB2	2.5~3.5	7.5~8.5	4.7~5.7	4.7~5.7	0.30	0.05	0.05	0.04	0.015	0.15

表 9-114 钛及钛合金的去应力退火规范

牌号	温度/℃	时间/h	牌号	温度/℃	时间/h	牌号	温度/℃	时间/h
工业纯钛 ^①	480~595	0.25~4	TC1	520~560	1~1.5	TC7	550~650	0.5~2
TA4	640~660	1~1.5	TC2	550~580	1~1.5	TC9	550~650	0.5~1
TA5	640~660	1~1.5	TC3	550~650	0.5~4	TC10 ^④	480~650	1~8
TA6	640~660	1~1.5	TC4 ^③	580~620	1~1.5	TB2	610~630	1~1.5
TA7 ^②	610~630	1~1.5	TC6	630~670	1~1.5			
TA8	610~630	1~1.5						

① 可采用的规范:540℃,0.5~1h;480℃,2~4h;427℃,8h。

② 可采用的规范:540~650℃,0.25~4h。

③ 可采用的规范:480~650℃,1~50h,或用590℃,1h。

④ 可采用的规范:590℃,2h。

表 9-115 钛的物理性能

密度 ρ (20℃) /g·cm ⁻³	熔点 /℃	线胀系数 α (0~100℃) /×10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹	比热容 c (20℃) /×4.2J·(g·℃) ⁻¹	热导率 λ (20℃) /×418.68W·(m·K) ⁻¹	电阻率 ρ (0℃) /×10 ⁻² Ω·mm ² ·m ⁻¹	弹性模量 E /MPa
450	1677	8.2	0.124	0.036 (α -Ti) ^①	42.1~47.8	108500

① 钛是有同素异构转变的金属,转变温度为882℃。882℃以下为六方晶格 α 钛,882℃以上为体心立方晶格 β 钛。

表 9-116 钛合金的物理性能

代号	密度 ρ /g·cm ⁻³	电阻率 ρ (20℃) /Ω·mm ² ·m ⁻¹	线胀系数 α (20~100℃) /×10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹	热导率 λ (25℃) /×418.68W·(m·K) ⁻¹	比热容 c (100℃) /×4.2J·℃	熔点 /℃	弹性模量 E /MPa
TA6	4.4	1.08	8.3	0.018	0.14		104000
TA7	4.46	1.57	9.36	0.021	0.13(20℃)	1590~1650	105000
TC2	4.55		8.0	0.02(20℃)		1570~1640	110000
TC4	4.43	1.6	8.41	0.02	0.13	1570~1650	113000
TC5	4.46	1.58	8.4	0.017	0.12		110000

表 9-117 退火保温时间

最大截面 /mm	保温时间 /min	最大截面 /mm	保温时间 /min	最大截面 /mm	保温时间 /min	最大截面 /mm	保温时间 /min
<1.5	10	1.5~2.0	15	2.1~5.5	25	>5.5	60

表 9-118 钛及钛合金退火规范

合金牌号	退火处理类别	产品类型	加热温度/℃	保温时间 ^① /min	冷却介质
工业纯钛	完全退火	棒材、锻件、型材	670~700		空气
		板 材	500~550		空气
TA4	完全退火	—	700~750	0.5~2	空气
TA5	完全退火	棒材、锻件、型材	800~850	—	空气
		板 材	750~800	—	空气
TA6	完全退火	棒材、锻件、型材	800~850	—	空气
		板 材	750~800	—	空气
TA7	完全退火	棒材、锻件、型材	800~850	—	空气
		板 材	750~800	—	空气
TA8	完全退火	—	750~800	1~2	空气
TC1	完全退火	棒材、锻件、型材	700~730	—	空气
		板 材	650~670	—	空气
	等温退火	—	840±10	—	炉冷
			650±10	1~1.5	空冷
TC2	完全退火	棒材、锻件、型材	700~730	—	空气
		板 材	650~670	—	空气
	等温退火	—	840±10	—	炉冷
			650±10	1~1.5	空冷
TC3	完全退火	—	700~800	1~2	空气
TC4 ^②	完全退火	—	700~800	1~2	空气
	等温退火	—	840±10	—	炉冷
			550±10	1~1.5	空冷
	多次退火	—	730以55℃/h 冷到565	4	炉冷 空气
			955以55℃/h 冷到565		炉冷 空气
			675以55℃/h 冷到565	1	炉冷 空气
	除氢退火	—	700~815炉 冷到590	0.5~2	炉冷 空气
TC6	完全退火	—	870±10	—	炉冷
	等温退火		650±10	1~1.5	空气
TC7	完全退火	棒材、锻件、型材	850±10	—	空气
		板 材	800~850	—	空气
	双重退火	—	920±10	—	空气
			590±10	—	空气
			590±10	1~1.5	空气
TC9 ^③	完全退火	—	600	—	空气
TC10	完全退火	—	700~830	0.75~8	空气
TB2	完全退火	—	800±10	0.5	空气

① 退火保温时间除注明者外,均按经验公式计算。

② TC4的完全退火也可采用下述规范:690~760℃保温0.5~2h,空冷或炉冷。等温退火可采用下述规范:对于板材,700~730℃保温后以不大于30℃/h速度炉冷至430℃后空冷。对于棒材和锻件,690~720℃保温2h空冷。对于挤压件,690~720℃保温2h,以不大于165℃/h速度冷到525~550℃后空冷。

③ 可采用双重退火规范:930℃,0.5h空冷,530℃,6h空冷。

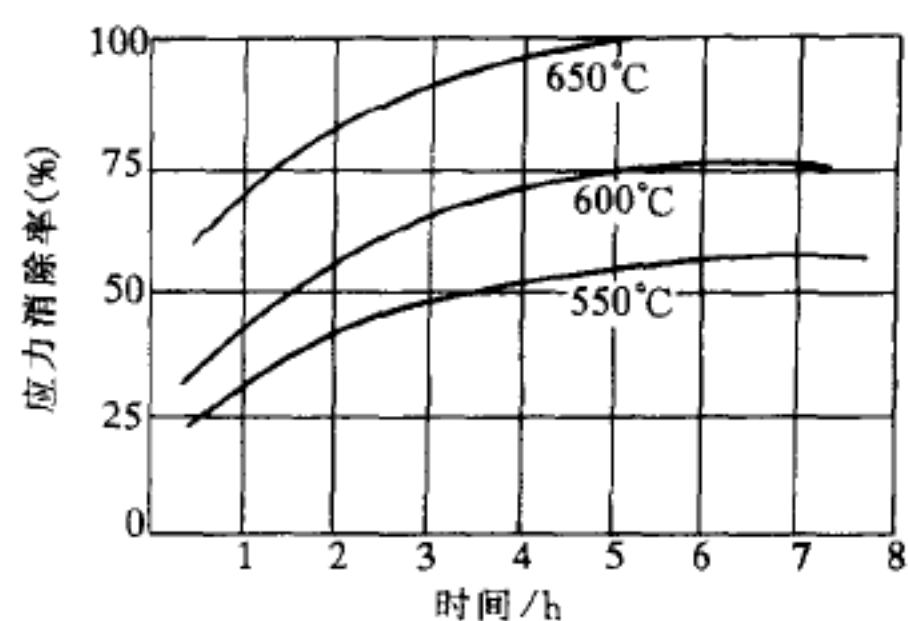


图 9-51 加热温度和时间对于消除
Ti-6Al-4V 合金中残余应力的影响

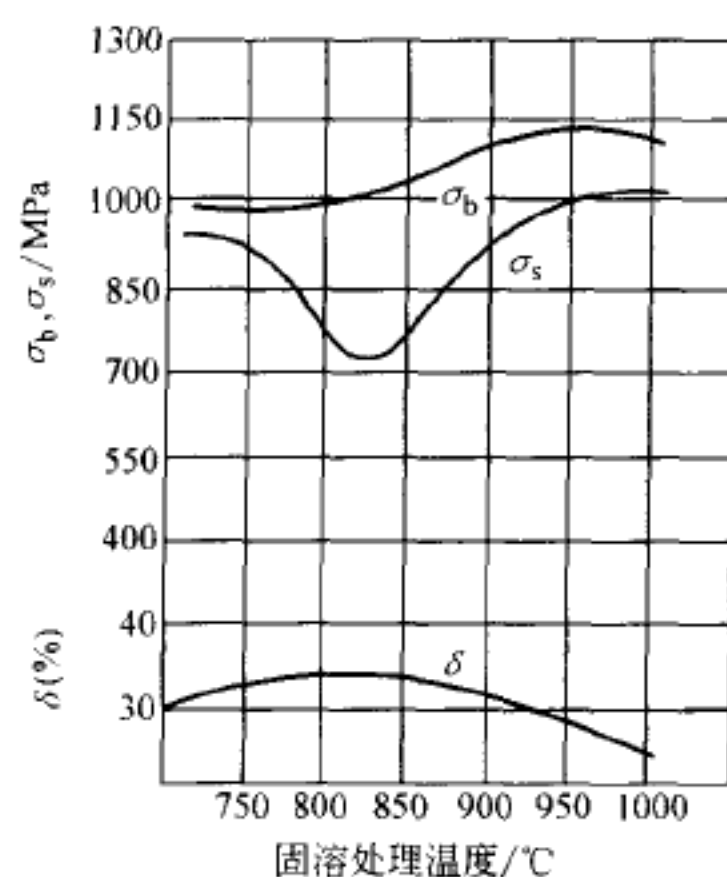


图 9-52 固溶处理温度对 Ti6Al4V
合金性能的影响

表 9-119 常用钛合金的 $\alpha + \beta \rightarrow$ 相变温度

合金牌号	β 转变点/°C	合金牌号	β 转变点/°C	合金牌号	β 转变点/°C
工业纯钛	890 ~ 920	TC1	910 ~ 930	TC7	1010 ~ 1030
TA4	960 ~ 980	TC2	920 ~ 940	TC8	1000 ~ 1020
TA5	980 ~ 1000	TC3	960 ~ 970	TC9	1000 ~ 1020
TA6	1000 ~ 1020	TC4	980 ~ 990	TC10	930 ~ 960
TA7	1000 ~ 1020	TC5	950 ~ 980	TB1	750 ~ 780
TA8	950 ~ 980	TC6	950 ~ 980	TB2	740 ~ 760

表 9-120 钛合金固溶处理和时效规范

合金牌号	产品类型	固 溶 处 理			时 效		
		加热温度 /°C	保温时间 ^① /h	冷却介质	加热温度 /°C	保温时间 ^① /h	冷却介质
TC3	—	800 ~ 850	—	水	420 ~ 500	4 ~ 6	空气
TC4 ^②	—	925 ± 10	0.5 ~ 2	水	500 ± 10	4	空气
	棒材、锻件、型材	900 ~ 950	0.5 ~ 1	水	510 ~ 590	2 ~ 3	空气
TC6	—	840 ~ 880	1 ~ 1.5	水	550 ~ 560	2 ~ 4	空气
TC9	—	900 ~ 950	1 ~ 1.5	水	500 ~ 600	2 ~ 6	空气
TC10 ^③	板材	880 ~ 930	0.25 ~ 0.5	水	570 ~ 595	4 ~ 8	空气
	棒材、锻件、型材	870 ~ 930	0.5	水	540 ~ 620	4 ~ 8	空气
TB2	—	800 ± 10	0.5	水	500 ± 10	8	空气

① 除注明者外,可按经验公式计算。

② 可采用下述规范:对于薄板,900 ~ 940°C加热 5 ~ 10min,水淬;对于大于 6.4mm 的厚板,925 ~ 955°C加热 0.5h,水淬;对于棒材锻件和挤压件,955 ± 15°C加热 2h 水淬。时效均为 540°C保温 4h 后空冷。

③ 固溶处理可采用下述规范:工件厚度 ≤ 25mm 时,845°C加热 1h 水淬;工件厚度在 25 ~ 50mm 时,870°C加热 1h,水淬;工件厚度 > 50mm 时,900°C加热 1h,水淬。

表 9-121 钛合金的力学性能

牌号	材 料	热处理 状态	试验温度 /℃	σ_b	$\sigma_{0.2}$	$\delta_{10}(\%)$	α_k	σ_{100}	$\sigma_{0.2/100}$
				/MPa			/kJ·m ⁻²	/MPa	
TA4	锻件 (截面 < 70mm)	退火	20	730	640	22	784	—	—
			200	420	360	28	1372	—	—
			300	370	320	26	1764	—	—
TA5	板材 (厚 12mm)	退火	20	700	650	15(δ_5)	588	—	—
			400	400	300	15.7	—	—	—
			500	380	300	13.5	—	—	—
TA6	板材	退火	20	800	690	15	294 ~ 490	—	—
			450	430	350	14	—	—	—
			500	350	—	—	—	200	—
TA7	板、棒	退火	20	750 ~ 950	650 ~ 850	8 ~ 15	3924	—	—
			350	500 ~ 600	340 ~ 460	—	—	450 ~ 500	—
			500	450 ~ 520	300 ~ 400	—	—	20	—
TA8	板、棒 ($\phi 12$)	退火	20	1040 ~ 1150	985 ~ 1040	10 ~ 13.5(δ_5)	235.2 ~ 313.6	—	—
			450	770	620	18	—	730	400
			500	750	620	17(δ_5)	—	500	320
TC1	板(厚 ≤ 10mm)	退火	20	600 ~ 800	—	20 ~ 25(δ_5)	—	—	—
TC2	板(厚 ≤ 10mm)	退火	20	700	—	12 ~ 15(δ_5)	—	—	—
TC3	板(厚 ≤ 10mm) 棒材	退火	20	900	—	8 ~ 10(δ_5)	—	—	—
		退火	20	1000 ~ 1150	900 ~ 1050	10 ~ 15(δ_5)	343 ~ 588	—	—
		退火	350	850	—	13	—	—	—
		退火	500	750	—	14	—	—	—
TC4	棒材 棒材、锻件	退火	20	950	—	10(δ_5)	392	—	—
		淬火时效	20	1190	—	13(δ_5)	—	—	—
		退火	350	777	630	16.8(δ_5)	—	—	—
		退火	400	630	—	—	—	580	360
TC6	棒材	淬火时效 —	20	1100	1000	12(δ_5)	—	—	—
			400	600	490	14(δ_5)	—	600	306
			500	560	420	15(δ_5)	—	360	53
TC7	棒材	—	20	1000 ~ 1100	950 ~ 1050	10 ~ 15(δ_5)	343 ~ 588	—	—
		—	400	867	—	14.9(δ_5)	—	700	—
		—	500	771	—	17.2(δ_5)	—	500	150
TC9	棒材	退火	20	1200	1030	11(δ_5)	—	—	—
			400	900	720	13(δ_5)	—	—	—
			500	870	720	14(δ_5)	—	≥ 650	280 ~ 310
			550	810	660	15(δ_5)	—	≥ 450	120 ~ 150
TC10	棒材($\phi 22$)	退火	20	1100 ~ 1150	1000	10 ~ 14(δ_5)	> 343	—	—
			400	—	—	—	—	800	—
			550	800	600	19(δ_5)	—	> 550	—
TB2	板材 (厚 1.0 ~ 3.5mm) 棒材	淬火时效	20	1350	—	8(δ_5)	—	—	—
		淬火	20	≤ 1000	—	20(δ_5)	—	—	—
		淬火时效	20	1350	—	7(δ_5)	147	—	—
		淬火	20	≤ 1000	—	18(δ_5)	294	—	—

表 9-122 钛及其合金板材力学性能

代号	板材厚度 /mm	σ_b /MPa	δ ($L = 5.65 \sqrt{F_0}$) (%)	弯曲角度 γ (度)	供应 状态
TA1	0.3 ~ 2.0	350 ~ 500	40	140	退火
	2.1 ~ 10.0		30	130	
TA2	0.3 ~ 2.0	450 ~ 600	30	100	退火
	2.1 ~ 10.0		25	90	
TA3	0.3 ~ 2.0	550 ~ 700	25	90	退火
	2.1 ~ 10.0		20	80	
TA6	0.8 ~ 1.5	700	20	50	退火
	1.6 ~ 2.0		15	40	
	2.1 ~ 10.0		12	40	
TA7	1.0 ~ 1.5	750 ~ 950	20	50	退火
	1.6 ~ 2.0		15	50	
	2.1 ~ 10.0		12	40	
TC1	0.5 ~ 1.0	600 ~ 800	25	90	退火
	1.0 ~ 2.0		25	70	
	2.1 ~ 10.0		20	60	
TC2	1.0 ~ 2.0	700	15	60	退火
	2.1 ~ 10.0		12	50	
TC10	1.0 ~ 4.0	1080	10	25	退火

表 9-123 钛合金板材高温力学性能

代号	温度 /℃	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa
TA6	350	430	400
	500	350	200
TA7	350	500	450
	500	450	200
TC1	350	350	330
	400	320	300
TC2	400	430	400
	500	420	390
TC10	400	900	800
	450	850	500

表 9-124 钛及其合金管材

(退火状态)力学性能

代号	σ_b /MPa	δ ($L = 11.3 \sqrt{F_0}$) (%)
不 小 于		
TA2	450 ~ 600	20
TA3	550 ~ 700	15
TC1	600	15
TC10	1050	$12(L = 5.65 \sqrt{F_0})$

表 9-125 钛及其合金棒材

(退火状态)力学性能

代号	σ_b /MPa	δ_5 (%)	ψ (%)	a_K /J·cm ⁻²
不 小 于				
TA1	350	25	50	80
TA2	450	20	45	70
TA3	550	15	40	50
TA6	700	10	27	30
TA7	800	10	27	30
TC1	600	15	30	45
TC2	700	12	30	40
TC4	950	10	30	40
TC5	950	10	23	30
TC10	1050	12	25	35
	1050	12	30	40

表 9-126 钛合金棒材(退火状态)

高温力学性能

代号	温度 /℃	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa
不 小 于			
TA6	350	430	400
TA7	350	500	450
TC1	350	350	330
TC2	350	430	400
TC4	400	630	580
TC5	400	600	560
TC10	400	850	800

表 9-127 钛合金铸件力学性能

代号	状 态	σ_b /MPa	δ (%)	ψ (%)	a_K /J·cm ⁻²
TA7	铸造的	930 ~ 950	9 ~ 12	10 ~ 27	—
	退火的	920 ~ 990	7 ~ 12	12 ~ 26	—
TC4	铸造的	900 ~ 980	9 ~ 11	10 ~ 25	19
	退火的	940 ~ 1010	7 ~ 12	17 ~ 32	—
	淬火时效的	1080 ~ 1400	1 ~ 7	1 ~ 10	17

表 9-128 钛合金低温力学性能

代 号	温 度/℃	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ (%)	ψ (%)
TA7	20	756	700	15.0	30.2
	-196	1240	1127	20.0	31.0
	-253	1573	1290	19.5	9.2
TC1	20	656	630	21.3	54.0
	-196	1155	1092	25.0	49.3
	-253	1380	949	15.4	—
TC4	20	980	875	13.0	—
	-196	1540	1435	12.0	—
	-253	1820	1750	5.0	—

表 9-129 几种钛合金最佳形变热处理工艺规范与性能对比

合 金	热 处 理 工 艺	室 温 性 能				450℃高温瞬时			450℃持久强度	
		σ_b /MPa	δ (%)	ψ (%)	σ_{-1} /MPa	σ_b /MPa	δ (%)	ψ (%)	应力 /MPa	破坏时 间/h
Ti6Al2.5Mo2Cr0.3- Si0.5Fe(BT3—1)	850℃淬火+550℃,5h时效	1150	10	48	560	770	15	46	690	73
	850℃变形50%~70%水冷,500℃ 5h时效	1460	10	45	610	920	13	67	690	163
Ti6Al4V(TC4)	880℃淬火+590℃2h	1160	15	43	500	743	18.5	63.5	750	110
	920℃变形50%~70%水冷,590℃ 2h	1400	12	50	590	985	15	63	750	120
Ti4.5Al6Mo1V	880℃淬火+480℃12h	1165	10	37	590	845	15	67	600	24
	850℃变形50%~70%水冷,480℃ 12h	1270	10	39	620	900	17	65	600	86
BT22	820℃变形30%水冷,630℃2h	1350	10	35	—	—	—	—	—	—

表 9-130 钛在各种介质中的耐蚀性

介 质	浓 度 (%)	温 度	腐蚀速度 /mm·a ⁻¹	评价 ^①	介 质	浓 度 (%)	温 度	腐蚀速度 /mm·a ⁻¹	评价 ^①
盐酸	5	室温	0	优 差 良 差	硝酸	37	室温	0	优 优 优 良
	5	沸腾	6.53			37	沸腾	小于0.127	
	10	室温	0.175			64	室温	0	
	20	室温	1.34			64	沸腾	0.437	
硫酸	5	室温	0	优 差 良 差	磷酸	30	室温	0	优 差
		沸腾	13.01			30	沸腾	17.60	
	5	室温	0.277		氯化钠	20℃饱和 溶液	室温	小于0.127	优 优
	60	室温	0.277				沸腾	小于0.127	
	80	室温	32.66		氢氧化钠	20	室温	小于0.127	优 优
						20	沸腾	小于0.127	

① 优—耐蚀,腐蚀速度在0.127mm/a以下。

良—中等耐蚀,腐蚀速度在0.127~1.27mm/a之间。

差—不耐蚀,腐蚀速度在1.27mm/a以上。

表 9-131 各国加工钛及钛合金牌号对照

材料名称	相 应 牌 号							
	GB	ISO	ASTM	JIS	ГОСТ	DIN	BS	NF
工业纯钛	TA0	Grade1	Grade1	1 级	—	Ti1	—	T40
	TA1	Grade2	Grade2	2 级	BT1-0	Ti2	—	—
	TA2	Grade3	Grade3	3 级	—	Ti3	—	—
	TA3	Grade4	Grade4	4 级	—	Ti4	—	—
α 合金	TA7	—	Grade6	YTAB525	BT5-1	TiAl5 Sn2.5	—	—
	TA7ELI	—	—	—	—	—	—	—
	TA9	—	Grade7	12 级	—	—	—	—
	TA10	—	Grade12	—	—	TiNi0.8 Mo0.3	—	—
$\alpha + \beta$ 合金	TC1	—	—	—	OT4-1	—	—	—
	TC2	—	—	—	OT4	—	—	—
	TC4	Ti-6Al-4V	Grade5	YTAB640	BT6	TiAl6V4	Ti-6Al-4V	TA6V
	TC6	—	—	—	BT3-1	—	—	—
	TC10	—	—	—	—	TiAl6V 6Sn2	—	—
	TC11	—	—	—	BT9	—	—	—

9.4 镁合金的热处理及性能(表 9-132 ~ 表 9-155,图 9-53 ~ 图 9-60)

表 9-132 镁合金的分类和特点

按加工工艺分类	按工作温度分类	按合金元素分类	特 点
铸造镁合金	常 温 ($\leq 150^{\circ}\text{C}$)	Mg-Al-Zn Mg-Zn-Zr Mg-Zr-RE	Mn 和 Mg 只形成固溶体,Mg 中加入 $w_{\text{Mn}}1.3\% \sim 2.5\%$ 可消除 Fe 对耐腐蚀性负面影响。Mg-Mn 合金不能热处理强化,无应力腐蚀倾向。Mn 过高塑性低,Mg-Mn 合金中加入 $w_{\text{Ce}}0.15\% \sim 0.35\%$ 可细化晶粒,提高强度、塑性和耐热性
变形镁合金	高 温 (250°C)	Mg-Mn Mg-Al-Zn Mg-Zn-Zr Mg-RE Mg-Li	Mg 中加 Al 可提高室温强度,改善铸造性能,可热处理强化。含 Al 过高($>9\%$)降低塑性和铸造性能易引起应力腐蚀 Zn 在 3% 以下能提高强度和热处理强化效果 Al 和 Zn 在 Mg 中的共同溶解度大,Mg-Al-Zn 合金可热处理强化,含合金元素多,强化效果好 Mg-Zn-Zr 合金中含 $w_{\text{Zn}}4\% \sim 6\%$,过高对铸,锻加工性都不利,加少量 Zr 可细化晶粒,减轻热裂,提高力学性能。该合金可热处理强化,加 Zr 合金不能同时加 Al、Si、Fe、Sn、Ni、Mn,只能加 Zn、RE、Cd、Ag、Te、Cu、Bi、Pb、Ca Mg-Mn、Mg-Al-Zn 和 Mg-Zn-Zr 合金耐热性差,只能在 150°C 以下工作,Mg-RE 合金可在 250°C 工作 Mg 中加 RE 可显著提高耐热性,细化晶粒,改善铸造和焊接性能,RE 原子序数愈大、效果愈好 Mg 合金中 Fe、Cu 和 Ni 杂质危害最大,含 Fe 必须小于 0.016% ,加入 $w_{\text{Mn}}0.15\% \sim 0.5\%$ 可和 Fe 形成难熔化合物,沉积于熔融金属底部,减少制件中的含 Fe 量

表 9-133 镁合金主要成分及力学性能

牌号	主要成分(质量分数)(%)							热处理状态 ^①	20℃		150℃		250℃		300℃	
	Zn	Zr	Mn	RE	Nd	Ce	Al		σ_b /MPa	δ (%)	σ_b /MPa	δ (%)	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}/100$ /MPa	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}/100$ /MPa
ZM1	3.5 ~ 5.5	0.5 ~ 1.0	—	—	—	—	—	T1, T6	240	5.0	—	—	—	—	—	—
ZM2	3.5 ~ 5.0	0.5 ~ 1.0	—	0.7 ~ 1.7	—	—	—	T1	220	4.0	—	—	—	—	—	—
ZM3	0.2 ~ 0.7	0.4 ~ 1.0	—	2.3 ~ 4.0	—	—	—	T2	145	3.0	—	—	145	25	110	—
ZM4	2.0 ~ 3.0	0.5 ~ 1.0	—	2.5 ~ 4.0	—	—	—	T1	150	4.0	—	—	130	30	95	—
ZM5	0.2 ~ 0.8	—	0.15 ~ 0.5	—	—	—	7.5 ~ 9.0	T4 (T6)	230 (230)	5 (2)	—	—	—	—	—	—
ZM6	0.2 ~ 0.7	0.4 ~ 1.0	—	—	2.0 ~ 3.0	—	—	T6	260	5.0	—	—	170	38	110	—
ZM8	5.5 ~ 6.5	0.5 ~ 1.0	—	2.0 ~ 3.0	—	—	—	T6	310	9.5	—	—	—	—	—	—
ZM9	—	—	—	—	—	—	—	T1	220	8.0	—	—	140	51	115	27
MB1	—	—	1.3 ~ 2.5	—	—	—	—	O	210	4	130	45	60	—	—	—
MB2	0.2 ~ 0.8	—	0.15 ~ 0.5	—	—	—	3.0 ~ 4.0	O	240	12	—	—	—	—	—	—
MB3	0.8 ~ 1.5	—	0.4 ~ 0.8	—	—	—	4.0 ~ 5.0	O	250	12	—	—	—	—	—	—
MB5	0.5 ~ 1.5	—	0.15 ~ 0.5	—	—	—	5.5 ~ 7.0	O	260	8.0	—	—	—	—	—	—
MB6	2.0 ~ 3.0	—	0.20 ~ 0.5	—	—	—	5.0 ~ 7.0	F	290	7.0	—	—	—	—	—	—
								T4	300	10.0	—	—	—	—	—	—
MB7	0.2 ~ 0.8	—	0.15 ~ 0.5	—	—	—	7.8 ~ 9.2	T4	300	8.0	—	—	—	—	—	—
MB8	—	—	1.5 ~ 2.5	—	—	0.15 ~ 0.35	—	M	250	18	160	—	120	—	—	—
MB15	5.0 ~ 6.0	0.3 ~ 0.9	—	—	—	—	—	T4	280	23.4	—	—	—	—	—	—
								T6	370	9.5	—	—	—	—	—	—

注： $w_{RE-Ce} \geq 45\%$ 的混和稀土； $w_{Nd} > 35\%$ 的混和稀土； $\sigma_{0.2}/100-100h$ 内残留变形 $\leq 0.2\%$ 的蠕变强度；Z—铸造；B—变形。

① 状态见表 9-63，O—退火状态，F—自由加工状态。

表 9-134 变形镁合金退火规范

合金牌号	完全退火		消除应力退火			
	温度/℃	时间/h	板 材		挤压和锻件	
			温度/℃	时间/h	温度/℃	时间/h
MB1	340 ~ 400	3 ~ 5	205	1	260	0.25
MB2	350 ~ 400	3 ~ 5	150	1	260	0.25
MB3	—	—	250 ~ 280	0.5	—	—
MB8 ^①	280 ~ 320	2 ~ 3	—	—	—	—
MB15	380 ~ 400	6 ~ 8	—	—	260	0.25

① 当要求较高的 σ_b 和 $\sigma_{0.2}$ 时，可以在 260 ~ 290℃ 进行退火；当要求较高的塑性时，则需要在 320 ~ 350℃ 进行退火。

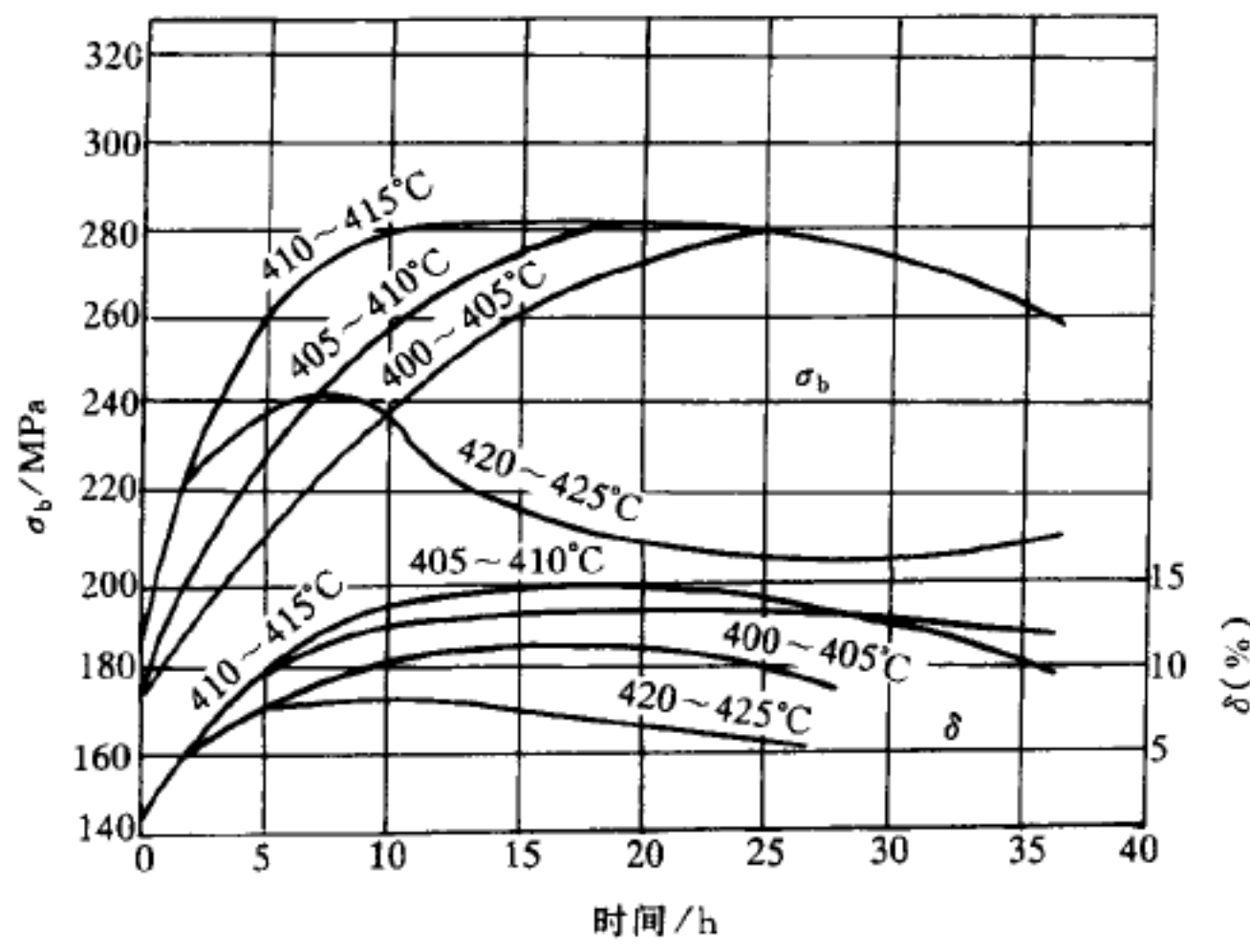


图 9-53 固溶温度和时间对 ZM5 合金性能的影响

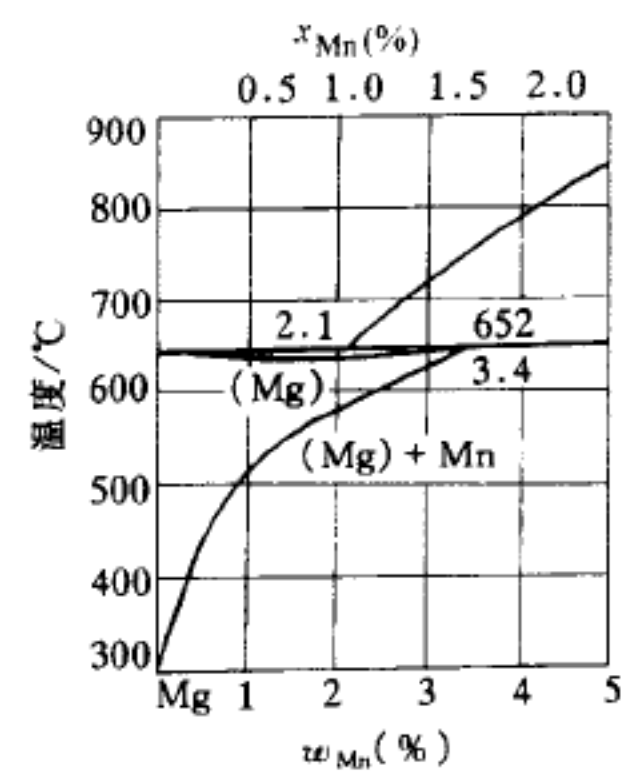


图 9-54 镁锰合金相图

表 9-135 常用镁合金热处理规程

合金系, 牌号		热处理类型 ^①	固 溶 处 理			时 效		
			加热温度/℃	保温时间/h	冷却介质	加热温度/℃	保温时间/h	冷却介质
高强度铸造镁合金	Mg-Al-Zn 系 ZM5	I : T4	415 ± 5	14 ~ 24	空气	175 ± 5	16	空气
		T6	415 ± 5	14 ~ 24	空气	200 ± 5	8	空气
	Mg-Zn-Zr 系 ZM1	II : T4	415 ± 5	6 ~ 12	空气	175 ± 5	16	空气
		T6	415 ± 5	6 ~ 12	空气	200 ± 5	8	空气
		T1	—	—	—	175 ± 5	28 ~ 32	空气
	ZM2	T1	—	—	—	195 ± 5	16	空气
耐热铸造镁合金	Mg-RE-Zn-Zr 系 ZM3 (ZM4)	T1	—	—	—	325 ± 5	5 ~ 8	空气
		T2	—	—	—	250 ± 5	10	空气
		T4	570 ± 5	4 ~ 6	压缩空气	—	—	—
		T6	570 ± 5	4 ~ 6	压缩空气	200	12 ~ 16	空气
	ZM6	T6	530 ± 5	8 ~ 12	压缩空气	205	12 ~ 16	空气
	(Mg-Y) ZM9	(或 T61) T1	—	(4 ~ 8)	—	310	(8 ~ 12) 16	空气
高强度变形镁合金	(Mg-Mn) MB1	T2	—	—	—	340 ~ 400	3 ~ 5	空气
	(Mg-Mn-Ce) MB8	T2	—	—	—	280 ~ 320	2 ~ 3	空气
	(Mg-Al-Zn) MB2	T2	—	—	—	280 ~ 350	3 ~ 5	空气
	MB3	T2	—	—	—	250 ~ 280	0.5	空气
	MB5	T2	—	—	—	320 ~ 380	4 ~ 8	空气
	MB6	T2	—	—	—	320 ~ 350	4 ~ 6	空气
	MB7	T4	380 ± 5	—	—	—	—	—
		T2	—	—	—	200 ± 10	1	空气
		T6	415 ± 5	—	—	175 ± 5	—	—
耐热变形镁合金	Mg-Nd-Zr MA11 MA12	T1	—	—	—	170 ± 5	10	空气
		T6	515	2	水	150	2	空气
	Mg-Li	T1	—	—	—	175	6	空气
		T2	—	—	—	150	16	空气

① 符号含义见表 9-63。

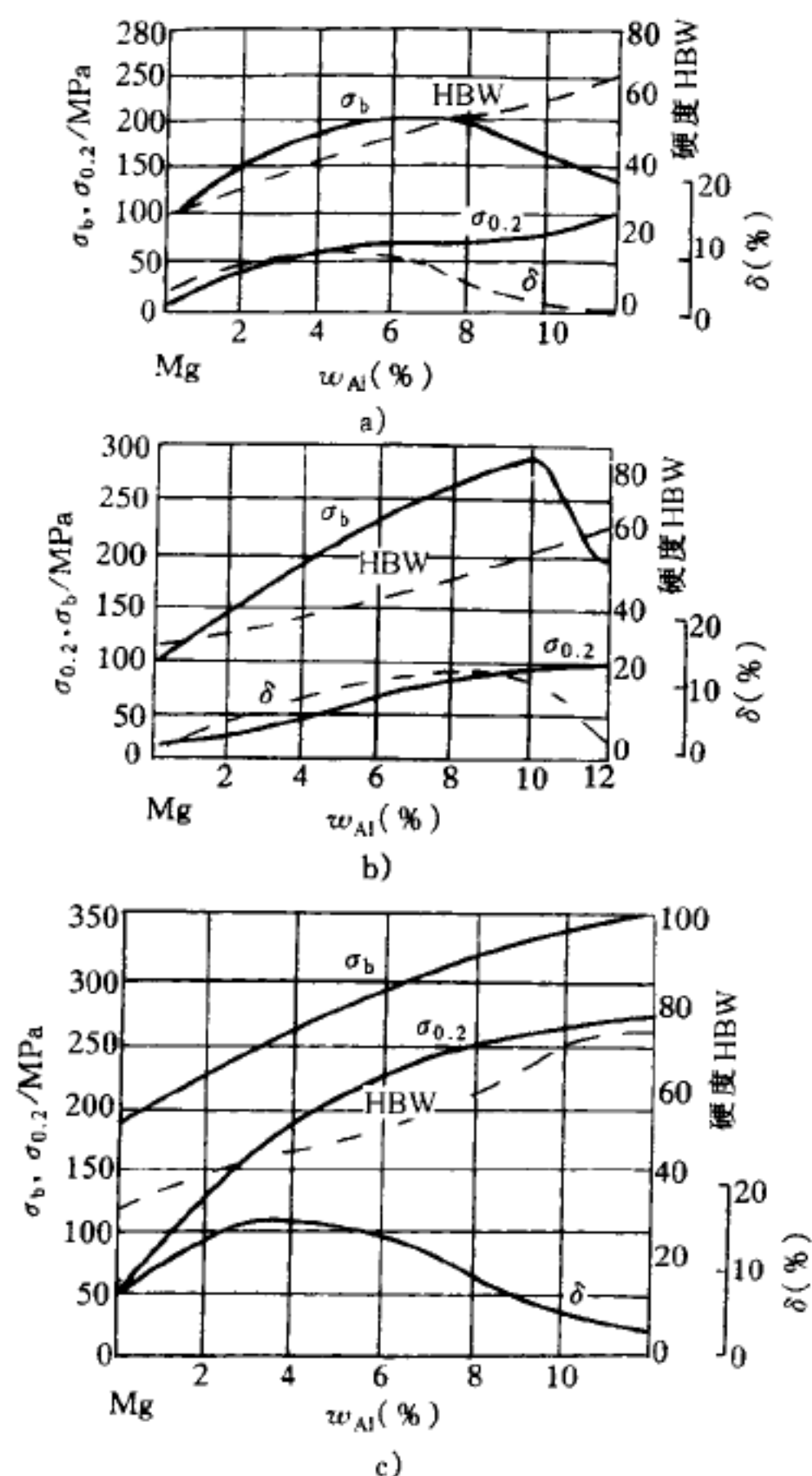


图 9-55 镁铝合金力学性能

a) 铸造 b) 淬火 c) 变形后

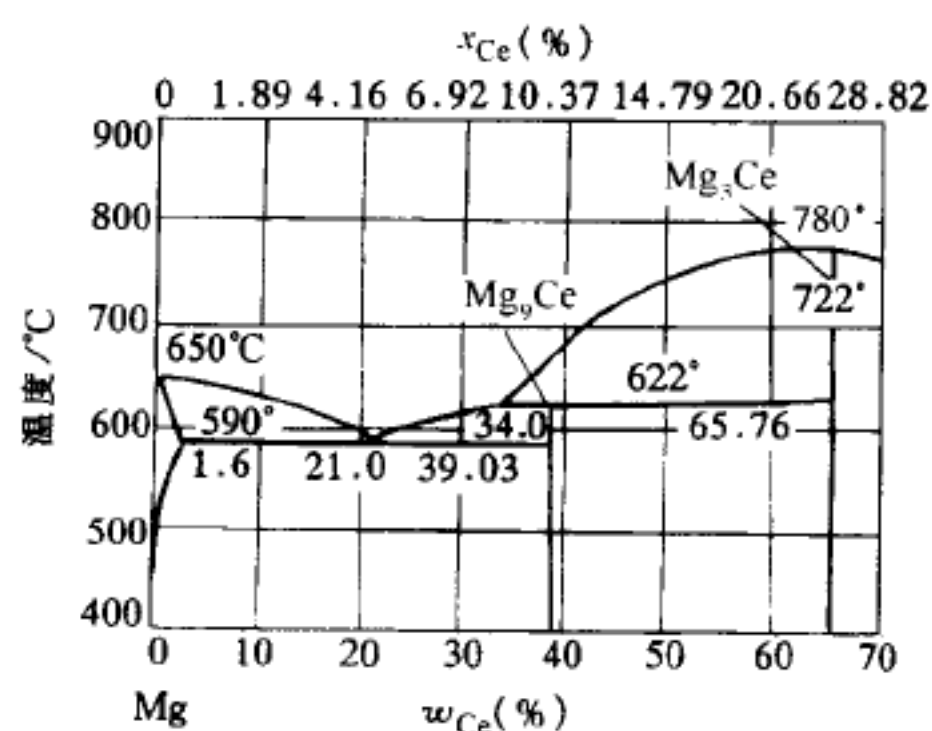


图 9-56 镁铈合金相图

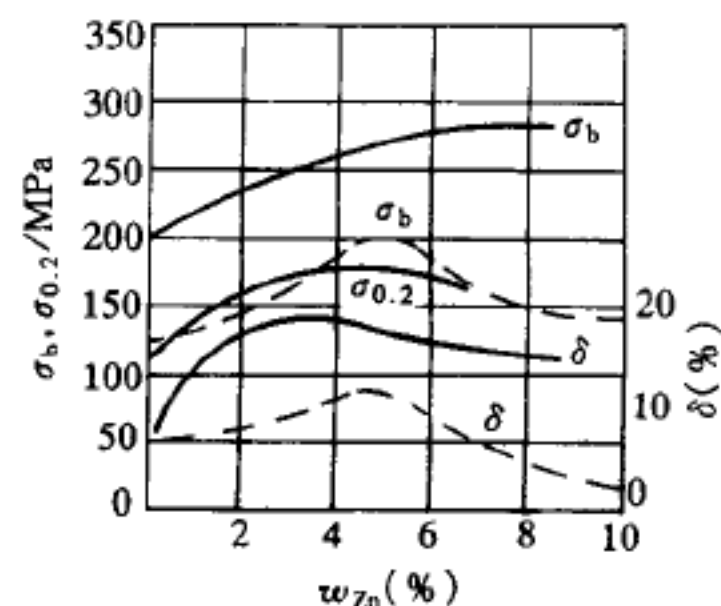


图 9-57 镁锌合金力学性能

—— 变形合金 ---- 铸造合金

表 9-136 铸造镁合金特点和用途

代号	主 要 特 点	用 途 举 例
ZM1	流动性较好,线收缩为 1.3% ~ 1.5%,热裂倾向大,不好焊接,抗拉强度和屈服强度高,力学性能壁厚效应小,耐蚀性较好	要求抗拉强度、屈服强度高,抗冲击的零件,如飞机轮毂、轮缘、隔框、支架
ZM2	流动性较好,线收缩为 1.3% ~ 1.5%,缩松轻,不易热裂,可焊接,力学性能较 ZM1 低,高温性能较好,耐蚀性较好	在 200℃ 以下工作的发动机零件及要求高屈服强度的零件,如发动机机匣、整流舱、电机壳体
ZM3	流动性尚可,线收缩为 1.2% ~ 1.5%,无缩松,对形状复杂零件有热裂倾向,可焊接,在 200 ~ 250℃ 下有良好的抗蠕变性能和瞬时强度,耐蚀性较好	在高温下工作和要求高气密性零件,如发动机增压机匣、压缩机匣、扩散器壳体及进气管道
ZM5	流动性好,线收缩为 1.1% ~ 1.2%,热裂倾向小,可焊接,力学性能壁厚效应较大,耐蚀性尚可	飞机、发动机、仪表和其他结构要求高载荷的零件,如机舱连结隔框、舱内隔框、电机壳体、轮毂轮缘、增压机匣

表 9-137 铸造镁合金力学性能

代号	热处理状态 ^①	σ_b/MPa	$\delta(\%)$	代号	热处理状态 ^①	σ_b/MPa	$\delta(\%)$
		不 小 于				不 小 于	
ZM1	T1	240	5	ZM3	—	120	1.5
	T6	260	6		T2	120	1.5
ZM2	T1	190	2.5	ZM5	—	150	2
					T4	230	5
					T6	240	2

① 符号含义见表 9-63。

表 9-138 铸造镁合金高温力学性能

代 号	热处理状态 ^①	力 学 性 能	试 验 温 度 /℃						
			100	125	150	175	200	250	300
ZM1	T1	σ_b/MPa	220	200	175	145	125	90	—
		$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	165	150	145	125	110	85	—
		$\delta_5(\%)$	13	14	16	—	—	—	—
	T6	σ_b/MPa	240	—	210	—	165	125	85
		$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	—	—	—	—	—	—	—
		$\delta_5(\%)$	20	—	21	—	23	27	28
ZM2	T1	σ_b/MPa	220	—	180	—	170	140	—
		$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	—	—	135	—	120	105	—
		$\delta_5(\%)$	8	—	26	—	33	35	—
ZM3	T2	σ_b/MPa	135	—	135	—	135	130	110
		$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	85	—	70	—	70	70	60
		$\delta_{10}(\%)$	—	—	—	—	14.3	—	—
ZM5	T4	σ_b/MPa	230	220	185	160	155	120	—
		$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	80	—	60	—	50	4.0	—
		$\delta_{10}(\%)$	10.0	12.0	12.0	15.0	15.0	15.0	—
	T6	σ_b/MPa	230	220	185	160	155	120	—
		$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	—	—	—	—	—	—	—
		$\delta_{10}(\%)$	6.0	8.0	10.0	12.0	15.0	15.0	—

① 符号含义见表 9-63。

表 9-139 ZM5 低温力学性能

试样状态 ^①	试验温度/℃	σ_b/MPa	$a_K/\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$	$\delta_{10}(\%)$	$\psi(\%)$
S	-40	230	3	4.0	6.0
T6	-70	250	3	4.0	6.0
	-196	250	3	2.0	4.0

注：单独铸造的试样，直径为 12mm。

① 符号含义见表 9-63，S—砂型铸造。

表 9-140 铸造镁合金物理性能

代 号	密 度 ρ /g·cm ⁻³	线胀系数 $\alpha/\times 10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$			热 导 率 λ / $\times 418.68\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$		比 热 容 ^① c / $\times 4.2\text{J}\cdot(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$
		20 ~ 100℃	20 ~ 200℃	20 ~ 300℃			
ZM1	1.82	25.8	26.2	26.46	50℃ 100℃ 200℃	0.27 0.28 0.29	0.23
ZM2	1.85	25.8	26.2	27.2	50℃ 100℃ 150℃ 200℃	0.28 0.29 0.30 0.30	0.23
ZM3	1.80	23.6	25.1	25.9	—		0.25
ZM5	1.81	26.8	28.1	28.7 ^②	0.185		0.25

① 温度为 20~100℃。
② 温度为 200~300℃。

表 9-141 铸造镁合金工艺参数

代号	铸造温度 /℃	热处理 状态 ^③	淬 火			退火、时效(或回火)		
			加热温度/℃	保温时间/h	冷却介质	加热温度/℃	保温时间/h	冷却介质
ZM1	750~820	T1 或 T2	—	—	—	300~350	4~6	空气
			500±5	2~3	空气	150±5	24	空气
ZM3	730~760	T2	—	—	—	300~350	3~5	空气
		T6	570±5	18	空气	200±5	16	空气
ZM5	690~800	T2	—	—	—	340~360	2~3	空气
		T4	分级加热 ^①	—	—	—	—	—
			(1)360±5	3	—	—	—	—
			420±5	13~21	空气	—	—	—
			(2)415±5 ^②	8~16	空气	—	—	—
		T6	分级加热 ^①	—	—	—	—	—
			(1)360±5	3	—	—	—	—
			420±5	13~21	空气	(1)175±5 (2)200±5	16 8	空气 空气
			(2)415±5 ^②	8~16	空气	(1)175±5 (2)200±5	16 8	空气 空气

① 分级加热淬火适用于厚度大于 12mm 的铸件。
② 一次加热淬火适用于厚度不大于 12mm 的或金属型铸造的铸件。
③ 符号含义见表 9-63。

表 9-142 变形镁合金特点及用途

代 号	产 品 种 类	主 要 特 点	用 途 举 例
MB1	板材、型材、锻件 及模锻件	室温塑性较低,高温塑性高,耐蚀性能良好,不能热处理强化,焊接性好,易气焊、氩弧焊和接触焊,可加工性好,无应力腐蚀破裂倾向	板材的焊接件和模锻件,汽油和润滑油系统附件,形状简单承力不大的耐蚀零件
MB2	棒材、型材、锻件 及模锻件	高温塑性高,冷状态下塑性中等,可气焊和氩弧焊,不能热处理强化,可加工性好,耐蚀性能尚可,有较小的应力腐蚀破裂倾向	形状复杂的锻件和模锻件

(续)

代 号	产 品 种 类	主 要 特 点	用 途 举 例
MB8	板材、棒材、管材、 锻件及模锻件	有中等强度和较好的高温性能,有良好的工艺塑性,板材在热状态下塑性较好,不能热处理强化,耐蚀性能良好,无应力腐蚀破裂倾向,可加工性好,易气焊、氩弧焊和接触焊	板材可制飞机蒙皮、壁板及内部零件,型材和管材制造汽油和滑油系统的耐蚀零件
MB15	棒材、型材、锻件 及模锻件	有较高的强度,能制造形状复杂的大型锻件,热处理工艺简单,耐蚀性良好,无应力腐蚀破裂倾向,可加工性良好,不能做焊接件	室温下承受大载荷的零件,如机翼长桁,翼肋等,使用温度不能超过 150℃

表 9-143 变形镁合金物理性能

代 号	密度 ρ /g·cm ⁻³	电 阻 率 ρ /Ω·mm ² ·m ⁻¹	比 热 容 c (20~100℃) /×4.2J·(g·℃) ⁻¹	线 胀 系 数 α (20~100℃) /×10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹	热 导 率 λ (30℃) /×418.68W·(m·K) ⁻¹	弹性模量 E /MPa
MB1	1.76	0.0513	0.25	22.29	0.3	40000
MB2	1.78	0.093	0.25	26.0	0.23 ^①	43000
MB3	1.79	0.120	0.25	26.1	0.23	42000
MB5	1.80	0.153	0.25	24.4	0.165	43000
MB6	1.84	0.196	0.25	23.4	—	45000
MB7	1.82	0.162	0.25	26.3	0.14	43000
MB8	1.78	0.0612	0.25	23.61	0.32	41000
MB14	1.76	0.062	0.32 ^②	22.67	0.265	42000
MB15	1.8	0.0565	0.247	20.9	0.28 ^①	43000

① 温度为 25℃。

② 温度为 100℃。

表 9-144 镁合金冷轧板材力学性能

代号	供应 状态	板材厚度 /mm	σ_b	$\sigma_{0.2}$	δ ($L = 11.3 \sqrt{F_0}$) (%)	代号	供应 状态	板材厚度 /mm	σ_b	$\sigma_{0.2}$	δ ($L = 11.3 \sqrt{F_0}$) (%)
			/MPa	/MPa					/MPa	/MPa	
			不 小 于						不 小 于		
MB1	O	0.8 ~ 3.0	190	110	6.0	MB3	O	3.5 ~ 5.0	240	140	12.0
		3.5 ~ 5.0	180	100	5.0			6.0 ~ 10.0	240	140	10.0
		6.0 ~ 10.0	170	90	5.0	MB8	O	0.8 ~ 3.0	230	120	12.0
MB2	O	0.8 ~ 3.0	240	130	12.0			3.5 ~ 5.0	220	100	11.0
		3.5 ~ 10.0	230	120	12.0			6.0 ~ 10.0	220	100	11.0
MB3	O	0.8 ~ 3.0	250	150	12.0		T8 ^①	0.8 ~ 3.0	250	160	10.0
						3.5 ~ 5.0		250	140	8.0	

注:力学性能为纵向性能。O—退火。

① 符号含义见表 9-63。

表 9-145 镁合金热轧板材力学性能

代号	供应 ^① 状态	板材 厚度 /mm	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa		δ ($L = 11.3 \sqrt{F_0}$) (%)
				拉伸	压缩	
			不 小 于			
MB1	热轧 (F)	12 ~ 20	21.0	10.0	—	4.0
		22 ~ 32	21.0	11.0	—	4.0
MB2	热轧 (F)	12 ~ 22	23.0	14.0	—	8.0
		22 ~ 32	23.0	14.0	—	8.0
MB3	热轧 (F)	12 ~ 20	25.0	15.0	—	6.0
		22 ~ 30	25.0	14.0	8.0	6.0
MB8	热轧 (F)	12 ~ 20	21.0	11.0	—	10.0
		22 ~ 32	21.0	11.0	7.0	6.0
		34 ~ 70	20.0	9.0	5.0	6.0

注：上表为纵向力学性能。
① F—自由加工状态。

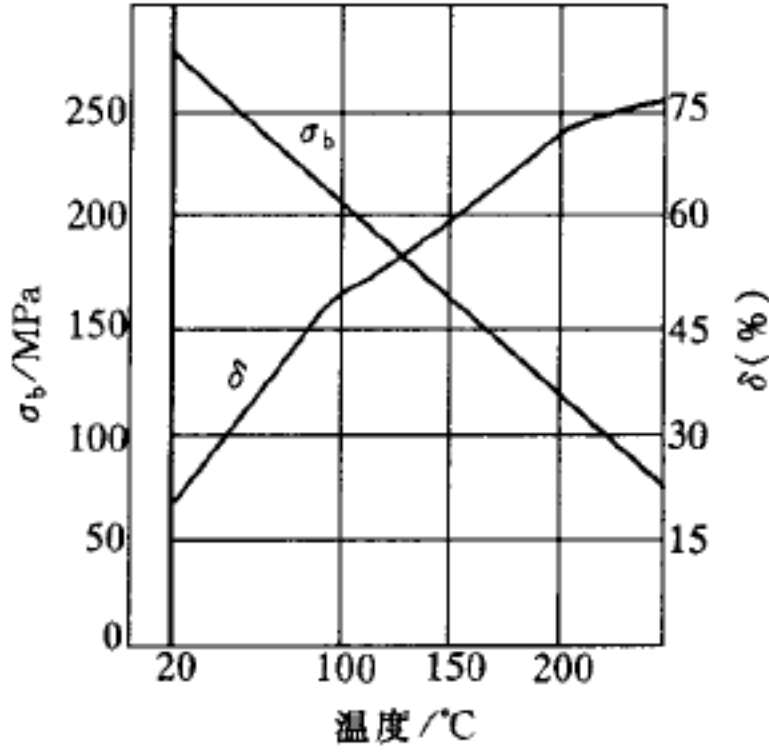


图 9-58 MB2 合金高温力学性能
(在试验温度下加热 30min)

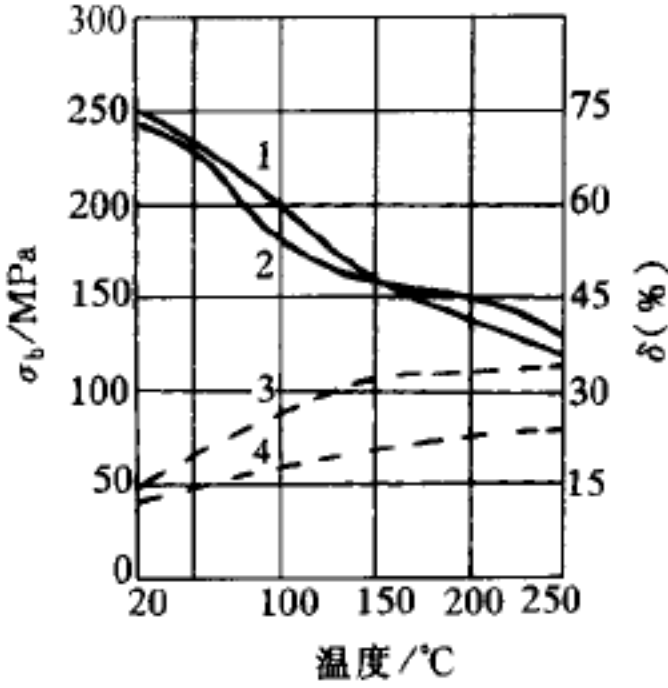


图 9-59 MB8 合金高温力学性能
(在试验温度下加热 30min)
1—棒材 σ_b 2—板材 σ_b
3—棒材 δ 4—板材 δ

表 9-146 镁合金挤压管材力学性能

代 号	状 态 ^①	力 学 性 能	
		σ_b /MPa	δ (%)
		不 小 于	
MB3	退火(O)	260	9.0
	热挤压(F)	260	9.0
MB8	退火(O)	230	8.0
	热挤压(F)	230	8.0

① O—退火状态 F—自由加工状态。

表 9-147 镁合金棒材力学性能

代号及 状态 ^①	棒材 直径 /mm	力 学 性 能			
		σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 (%)	HBW
		不 小 于			
MB1(F)	≤ 130	18	—	2	40
MB2(F)	≤ 130	26	—	5	45
MB8(F)	≤ 130	22	—	—	—
MB15(S)	≤ 100	32	25	6	75

① F—自由加工状态 S—砂型铸造。

表 9-148 镁合金型材力学性能

代号状态 ^①	力 学 性 能 (不 小 于)		
	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ (%)
MB1(F)	260	—	4
MB8(F)	230	—	10
MB15(S)	320	250	7

① 符号同表 9-147。

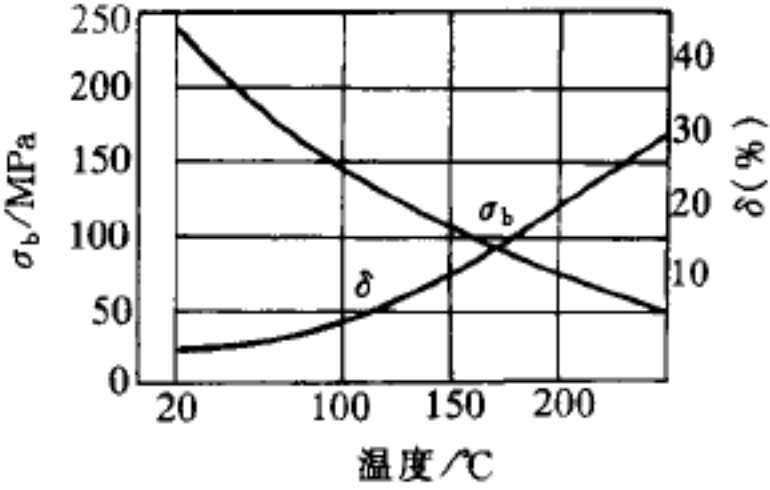


图 9-60 MB1 合金高温力学性能
(在试验温度下加热 30min)

表 9-149 MB14 合金力学性能

材 料 品 种	试验温度 /℃	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ (%)	E /MPa	持久强度 σ_{10^2} /MPa	蠕变强度 $\sigma_{0.2/10^2}$ /MPa
模锻件	20	250	160	10	42000	—	—
挤压棒材(未经热处理)	20	260	180	10	42000	—	—
	100	230	—	17	—	—	—
	150	180	—	17	—	120~130	100
	200	160	—	22	—	80~90	30
	250	130	—	25	—	—	—
	300	90	—	50	—	—	—
	-70	270	—	7.5	—	—	—
	-196	290	—	6.0	—	—	—

表 9-150 MB8 合金低温力学性能(1.2mm 退火板材)

试 样 形 式	试验温度 /℃	纵 向		横 向	
		σ_b /MPa	δ (%)	σ_b /MPa	δ (%)
光滑试样	-70	340	9.0	290	14.0
	-40	330	12.5	300	15.5
	+20	265	11.0	220	19.0
带缺口试样	-70	26.5	—	190	—
	-40	27	—	220	—
	+20	24.5	—	190	—

表 9-151 MB2(R) 合金棒材低温力学性能

试 验 温 度 /℃	σ_b /MPa	δ (%)	ψ (%)	a_K /J·cm ⁻²
+20	270	16	27	12
-40	300	14	20	9
-70	310	13	18	7

表 9-152 MB15 合金低温力学性能

材料品种及状态	试验温度 /℃	抗拉强度/MPa		δ_{10} (%)	ψ (%)	a_K /J·cm ⁻²	$\frac{\sigma_{bH}}{\sigma_b}$
		光滑试样 σ_b	带缺口试样 σ_{bH}				
挤压带材(截面 80×40)S 状态 ^①	+20	330	400	11	18	6	1.2
	-40	390	420	9.0	10	5	1.08
	-70	410	460	8.0	8	4	1.11

① S—砂型铸造。

表 9-153 变形镁合金工艺参数

代号	浇注 温度 /℃	均匀化退火			热加工 温度 /℃	退 火			淬 火			时 效		
		温度 /℃	保温 时间 /h	冷却 方式		温度 /℃	保温 时间 /h	冷却 方式	温度 /℃	保温 时间 /h	冷却 方式	温度 /℃	保温 时间 /h	冷却 方式
MB1	720~750	410~425	12	空冷	260~450	320~350	0.5	空冷	—	—	—	—	—	—
MB8	720~750	410~425	12	空冷	280~450	250~350	1	空冷	—	—	—	—	—	—
MB2	700~745	390~410	10	空冷	275~450	280~350	3~5	空冷	—	—	—	—	—	—

(续)

代号	浇注温度 /℃	均匀化退火			热加工温度 /℃	退火			淬火			时效		
		温度 /℃	保温时间 /h	冷却方式		温度 /℃	保温时间 /h	冷却方式	温度 /℃	保温时间 /h	冷却方式	温度 /℃	保温时间 /h	冷却方式
MB3	710 ~ 745	380 ~ 420	6 ~ 8	空冷	250 ~ 450	250 ~ 280	0.5	空冷	—	—	—	—	—	—
MB5	710 ~ 730	390 ~ 405	10	空冷	250 ~ 340	320 ~ 350	0.5 ~ 4	空冷	—	—	—	—	—	—
MB6	710 ~ 730	—	—	—	280 ~ 350	320 ~ 350	4 ~ 6	空冷	分级加热 1) 335 ± 5 2 ~ 3 2) 380 ± 5 4 ~ 10 热水			—	—	—
MB7	710 ~ 730	390 ~ 405	10	空冷	300 ~ 400	350 ~ 380	3 ~ 6	空冷	410 ~ 425	2 ~ 6	空冷或热水	175 ~ 200	8 ~ 16	空冷
									410 ~ 425	2 ~ 6	空冷或热水	—	—	—
									—	—	—	175 ~ 200	8 ~ 16	空冷
MB15	690 ~ 750	360 ~ 390	10	空冷	340 ~ 420	—	—	—	—	—	—	170 ~ 180	10 ~ 24	空冷
									505 ~ 515	24	空冷	160 ~ 170	24	空冷

表 9-154 国外耐热镁合金及超轻镁锂合金

牌号		Nd, Th ^① (%)	Zr ^① (%)	Zn ^① (%)	Mn ^① (%)	Li, La, Y, Ce ^① (%)	Ni, Cd, Sn, Al ^① (%)	σ_b	$\sigma_{0.2}$	δ	$\sigma_{0.2}$ 100/ 100	$\sigma_{0.2}$ 300/ 100	$\sigma_{0.2}$ 350/ 100
								/MPa		(%)	/MPa		
耐热铸造镁合金	MA19	1.62 ~ 2.3 (Nd)	0.4 ~ 1.0	0.1 ~ 0.6	—	1.4 ~ 2.2 (Y)	—	220	120	4	—	35	7
	HK31	3.2 (Th)	0.7	—	—	—	—	190	90	4	—	23	7
	HZ32	2.5 ~ 4.0 (Th)	0.4 ~ 1.0	1.7 ~ 2.5	—	—	—	190	90	6	—	37	13
耐热变形镁合金	HM21	2(Th)	—	—	0.6	—	—	—	—	—	—	63	—
	MZ11	0.8(Th)	0.6	0.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	MA11	2.5 ~ 5.5 (Nd)	—	—	1.5 ~ 2.5	—	0.1 ~ 0.22 (Ni)	—	—	—	—	—	—
	MA12	2.5 ~ 3.5 (Nd)	0.3 ~ 0.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	MA15	—	0.45 ~ 0.9	2.5 ~ 3.5	—	0.7 ~ 1.1 (La)	1.2 ~ 2.0 (Cd)	300 ~ 320	250 ~ 260	6 ~ 14	—	—	—
	MA19	1.4 ~ 2.0 (Nd)	0.5 ~ 0.9	5.5 ~ 7.0	—	—	0.2 ~ 1.0 (Cd)	380 ~ 400	330 ~ 360	5 ~ 8	—	—	—
	MA20	—	0.05 ~ 0.12	1.0 ~ 1.5	—	0.12 ~ 0.25 (Ce)	—	240 ~ 260	140 ~ 180	15 ~ 20	—	—	—
超轻镁锂合金	NMB1	—	—	0.6 ~ 1.2	0.2 ~ 0.8	4.5 ~ 6.0 (Li)	0.6 ~ 1.2 (Sn)	290 ~ 300	210 ~ 220	8	120	—	—
	MA21	—	—	0.18 ~ 2.0	0.1 ~ 0.5	7.0 ~ 10.0 (Li)	3.0 ~ 5.0 (Cd) 4.0 ~ 6.0 (Al)	210 ~ 280	160 ~ 250	8 ~ 25	60	—	—
	MA18	—	—	2.0 ~ 2.5	0.1 ~ 0.4	0.15 ~ 0.35 (Ce) 10.0 ~ 11.5 (Li)	0.5 ~ 1.0 (Al)	160 ~ 220	120 ~ 180	15 ~ 40	—	—	—

① 成分均指质量分数。

表 9-155 各国镁合金牌号对照表

中 国	俄罗斯	美 国	英 国	德 国	日 本
GB(YB)	ГОСТ	AA, ASTM	BS	DIN	JIS
ZM1	MJ112	ZK51A	2L127		
ZM2		ZE41A	2L128		
ZM3	MJ111				
ZM5	MJ115	AZ81A	3L122		
MB1	MA1	A1M1A	DTD737		
			DTD142		
			DTD118		
			AM503		
MB2	MA2	AZ31C	MAG111	MgAl ₃ Zn	M1
MB3	MA2-1				
MB5	MA3	AZ61A	MAG121	MgAl ₆ Zn	M2
MB6	MA4				
MB7	MA5	AZ80X	88B	MgAl ₇ Zn	AZ61A
MB8	MA8				AZ80A
MB15	BM65-1	AK60A	DTD5031		AK60A
			DTD5041		

9.5 镍和镍合金的性能(表 9-156 ~ 表 9-163,图 9-61 ~ 图 9-65)

表 9-156 纯镍工艺参数

浇注温度 /℃	热加工温度 /℃	退火温度 /℃	收缩率 (%)
1500 ~ 1550	800 ~ 1200	650 ~ 800	2

表 9-157 镍合金工艺参数

代 号	浇注温度 /℃	热加工温度 /℃	退火温度 /℃	收缩率 (%)
NCu28—2.5—1.5	1500 ~ 1550	1000 ~ 1150	700 ~ 850	2.10
NCu40—2—1	1420 ~ 1480	1040 ~ 1180	550 ~ 800	
NMn3	1500 ~ 1560	1150 ~ 1200	650 ~ 900	
NMn5	1520 ~ 1580	1150 ~ 1250	650 ~ 900	

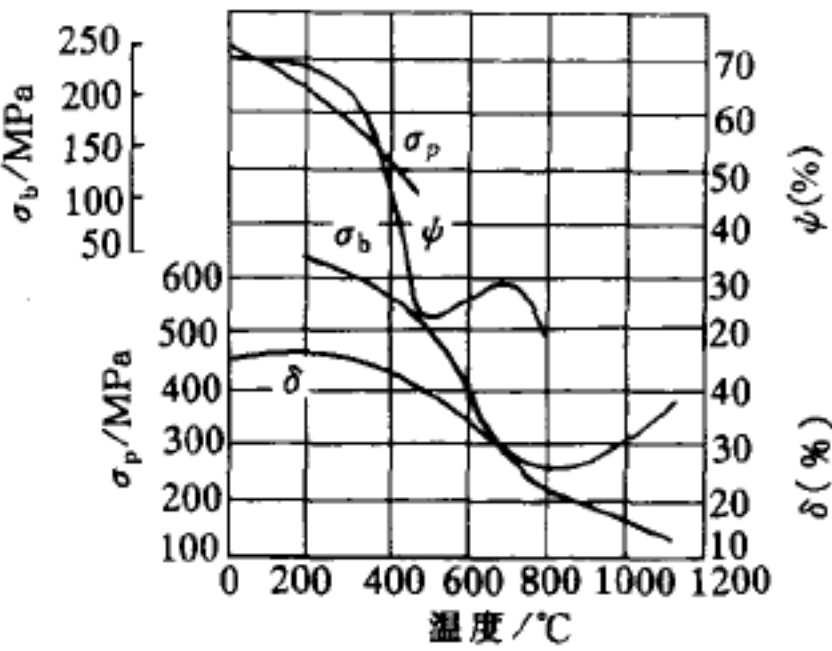


图 9-62 温度对 NCu28—2.5—1.5 合金力学性能的影响

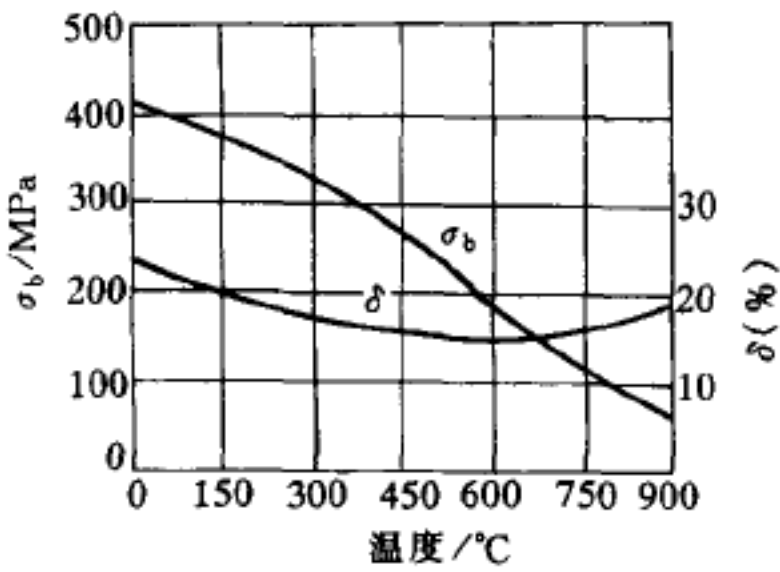


图 9-61 温度对纯镍力学性能的影响

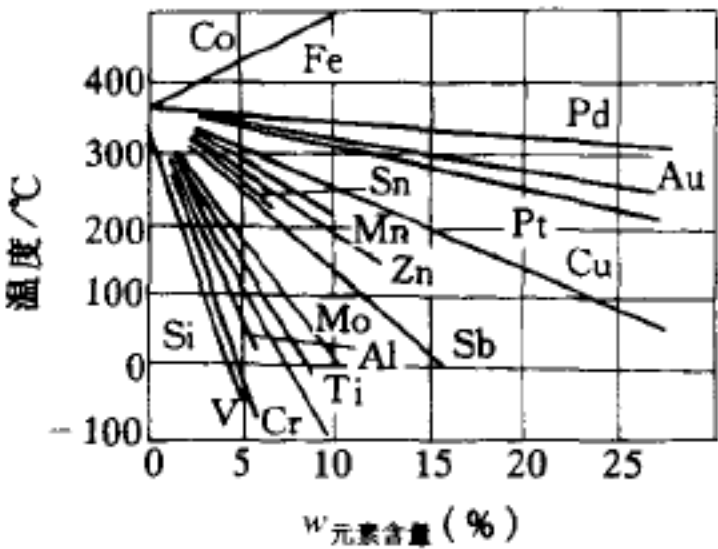


图 9-63 元素对镍的磁性转变温度的影响

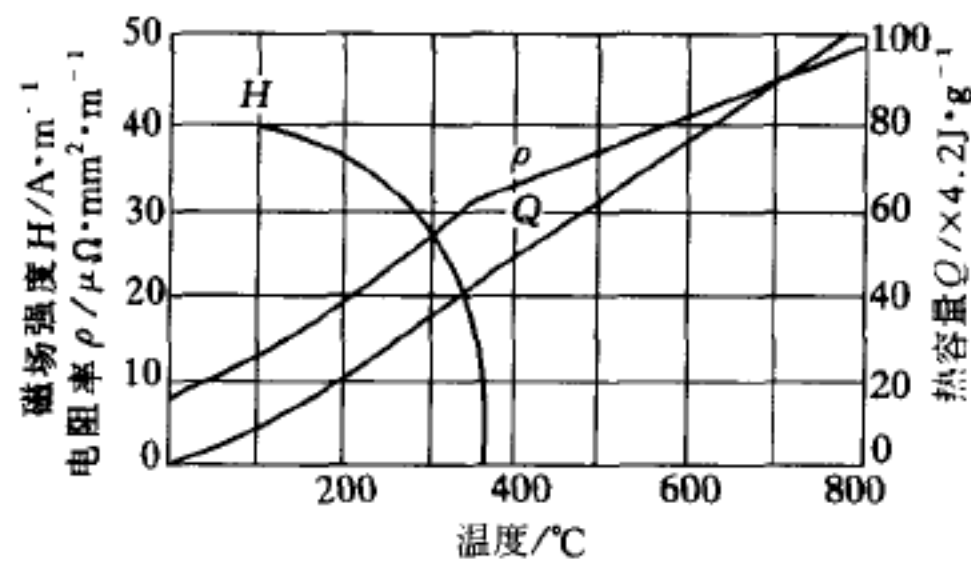


图 9-64 温度对纯镍物理性能的影响

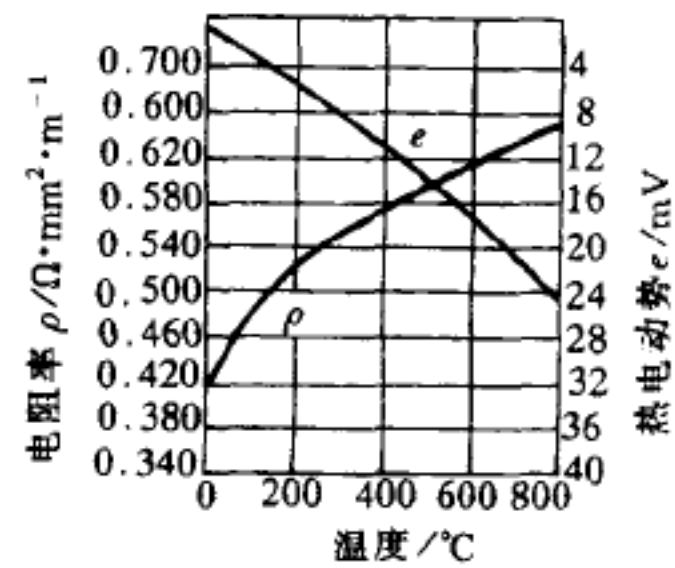


图 9-65 温度对 NCu28—2.5—1.5 合金物理性能的影响

表 9-158 镍及镍合金的物理性能

代 号	密度 ρ /g·cm ⁻³	电阻率 ρ (0℃) /×10 ⁻² Ω·mm²·m ⁻¹	电阻温度系数 (0℃) /×10 ⁻³ ·℃ ⁻¹	热导率 λ (20℃) /×418.68 W·(m·K) ⁻¹	比热容 c (20℃) /×4.2 J·(g·℃) ⁻¹	线胀系数 α (0~100℃) /×10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹	居里点 (磁性转 变温度) /℃
纯 镍	8.9	6.84	5.0~6.0	0.22	0.105	13.4	360
NCu28—2.5—1.5	8.8	4.25	1.9	0.06	0.127		27~95
NMn3	8.9	1.40	4.2	0.127			
NMn5	8.76	1.95	3.6	0.115			

表 9-159 纯镍加工产品力学性能

代 号	产品名称 及状态 ^①	产品规格	σ_b /MPa	δ (%)
			不 小 于	
N2、N4、 N6、N7	冷轧带 O	厚 0.5~1.2	400	35
	T8	厚 0.5~1.2	550	2
	冷轧板 O	厚 0.5~10	400	35(32) ^①
	T8	厚 0.5~10	550	2
N2、N4、 N6	拉 制 O	0.3~18	400	35
	薄壁管 T8	0.3~18	550	1
N6	挤压管 F	75~120	350	20
	拉制管 T8	5~50	450	5
N6	挤制棒 F	40~80	350	20
N2、N4、 N6、N7 及 N8	线 O	直径		
		0.03~0.20	430	18
		0.21~0.48	430	20
		0.50~1.00	400	25
	线 T4	1.05~8.00	380	26
		0.10~0.50	850~1000	—
		0.53~1.00	700~850	—
		1.05~5.0	550~700	—
	线 T8	0.03~0.09	900~1350	—
		0.10~0.50	800~1100	—
		0.53~1.00	750~1000	—
		1.05~5.00	700~900	—
		5.3~8.0	600~850	—

注：括号内为 N2、N4 的性能。

① T4、T8 见表 9-63；O—退火状态，F—自由加工状态。

表 9-160 蒙乃尔 NCu28—2.5—1.5 合金力学性能

产品名称	状 态 ^①	尺寸 /mm	σ_b /MPa	δ (%)
			不 小 于	
镍铜合金板 (蒙乃尔合金 板)	热轧 F	5~14	450	20
	冷轧 O	0.5~10	450	25
	T4	0.5~10	580	6.5
	T8	2~10	650	2.5
镍铜合金管 (蒙乃尔合金 管)	拉 制 T8	0.3~18	600	1
	(薄壁管) T4	0.3~18	550	6
	O	0.3~18	400	20
	拉 制 T8	3~25	600	5
	O	3~25	400	25
镍铜合金棒 (蒙乃尔合金 棒)	拉 制 O	16~40	450	20
	T8	16~40	600	—
	挤 制 F	20~80	400	25
镍铜合金线 (蒙乃尔合金 线)	O	0.05~0.49	450	15
		0.5~4.9	450	25
		5.0~6.0	450	30
	T8	0.05~0.49	800	—
		0.5~4.9	700	1.0
		5.0~6.0	650	1.0

① 符号含义同表 9-159①。

表 9-161 蒙乃尔 NCu28—2.5—1.5 合金低温力学性能(软状态)

温度/℃	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ (%)	温度/℃	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ (%)
20	150	500	41	- 80	190	600	40
- 10	180	540	48	- 120	200	640	41
- 40	180	560	47	- 180	210	790	51

表 9-162 火花塞(内燃机)用镍合金力学性能

代 号	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ (%)	HB
NMn3	500	165 ~ 220	40	140
NMn5	550 ~ 600	180 ~ 240	40 ~ 45	147

表 9-163 NCu28—2.5—1.5 合金适用范围

适宜在下列 介质中工作	可在下列 介质中工作	不宜在下列 介质中工作	适宜在下列 介质中工作	可在下列 介质中工作	不宜在下列 介质中工作
氨气 氨水溶液 苛性碱和碳酸盐溶液 食盐 脂肪酸及大部分有机酸 海水及卤水	硫酸 磷酸 氰氢酸 氢氟酸 醋酸 柠檬酸	盐酸 硝酸 熔融铝 熔融锌 氰化钾粉末及溶液 亚硫酸	中性盐水溶液 汽油、矿物油 酚、甲酚 摄影用试剂 染料溶液 酒精	硫酸亚铁溶液 干燥的氯	三氯化铁 铬酸

9.6 锌合金的热处理和性能(表 9-164 ~ 表 9-169,图 9-66)

表 9-164 纯锌物理性能

性 能	数 据	性 能	数 据
密度 ρ /g·cm ⁻³	7.13	线胀系数 α /×10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹	39.5
熔点/℃	419.5	电阻率 ρ /×10 ⁻² Ω·mm ² ·m ⁻¹	5.75
比热容 c (20℃)/×4.2J·(g·℃) ⁻¹	0.0925	电阻温度系数/×10 ⁻³ ·℃ ⁻¹	4.2
热导率 λ (20℃)/×418.68W·(m·K) ⁻¹	0.27	弹性模量 E /MPa	94000 ~ 130000

表 9-165 铸造锌合金物理性能

代 号	熔点 /℃	密度 ρ /g·cm ⁻³	线胀系数 α (20 ~ 100℃) /×10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹	热导率 λ (70 ~ 140℃) /×418.68W·(m·K) ⁻¹	电阻率 ρ (20℃) /Ω·mm ² ·m ⁻¹
ZZnAl10—5	378 ~ 395	6.3	27	0.24	0.0637 0.0654
ZZnAl9—1.5	380 ~ 410	6.2	27	0.24	
ZZnAl4	381 ~ 387	6.6	27.4	0.27	
ZZnAl4—1	380 ~ 385	6.7	27.4	0.26	

表 9-166 锌合金加工产品物理性能

代 号	熔点 /℃	弹性模量 E /MPa	线胀系数 α (20 ~ 100℃) /×10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹	密度 ρ /g·cm ⁻³
ZnCu1	422 ~ 420	—	34.8	7.18
ZnAl15	150 ~ 380	113000	27 ~ 28	5.7
ZnAl10—5	395 ~ 378	—	27	6.3
ZnAl10—1	410 ~ 380	130000	27 ~ 28	6.2
ZnAl4—1	385 ~ 380	130000	27.4	6.7
ZnAl0.2—4	470 ~ 424	126000	—	7.25

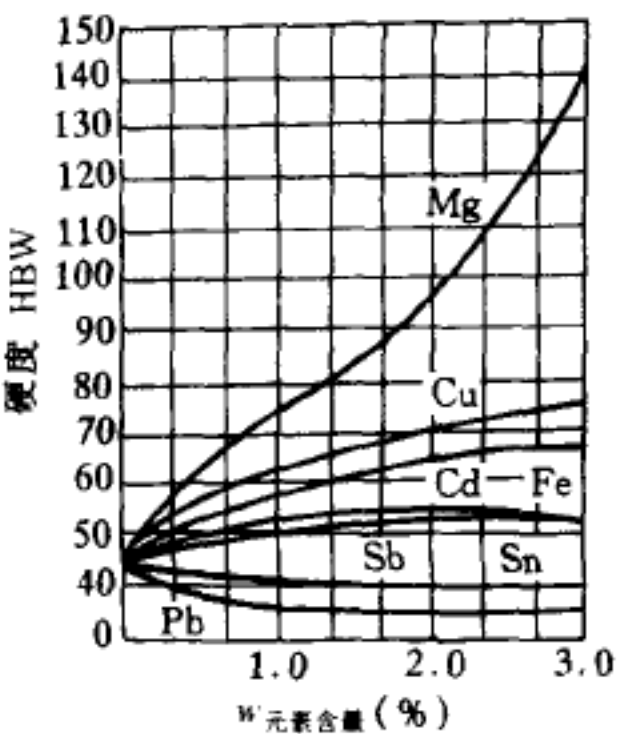


图 9-66 合金元素对锌硬度的影响
(金属型铸造的精炼锌)

表 9-167 锌合金加工产品力学性能

代 号	σ_b /MPa	δ (%)	ψ (%)	a_K /J·cm ⁻²	HBW
ZnCu1	200~300	20~30	70~80	15~20	45~75
ZnAl15	250~400	10~40	40~60	13~16	60~100
ZnAl10—5	350~450	12~18	—	5~10	90~110
ZnAl10—1	400~460	8~12	45~60	18~21	90~110
ZnAl4—1	370~440	8~12	25~60	18~22	90~105
ZnAl0.2—4	300~360	20~30	60~70	5~7	75~90

表 9-168 铸造锌合金力学性能

代 号	铸造方法 ^①	σ_b /MPa	δ (%)	HB
		不 小 于		
ZZnAl10—5	S	280	0.5	80
	J	300	1.0	100
ZZnAl9—1.5	S	280	0.7	90
	J	320	1.5	105
ZZnAl4—1	J	180	0.5	80
	Y	280	2	80
ZZnAl4—0.5	Y	280		75
ZZnAl4	Y	250	5	65

① S—砂型铸造,J—金属型铸造,Y—压力铸造。

表 9-169 锌在各种环境中的腐蚀速度

环 境	腐蚀速度 /mm·a ⁻¹
农村大气	0.001~0.0001
海洋大气	0.0015
工业区大气	0.005
水	淡水中相当稳定,硬水 比软水的腐蚀程度低
水中含有 O ₂ ,CO ₂ ,SO ₂ (%)	0.03~0.05

9.7 铸造轴承合金的性能(图 9-67 和图 9-68,表 9-170~表 9-175)

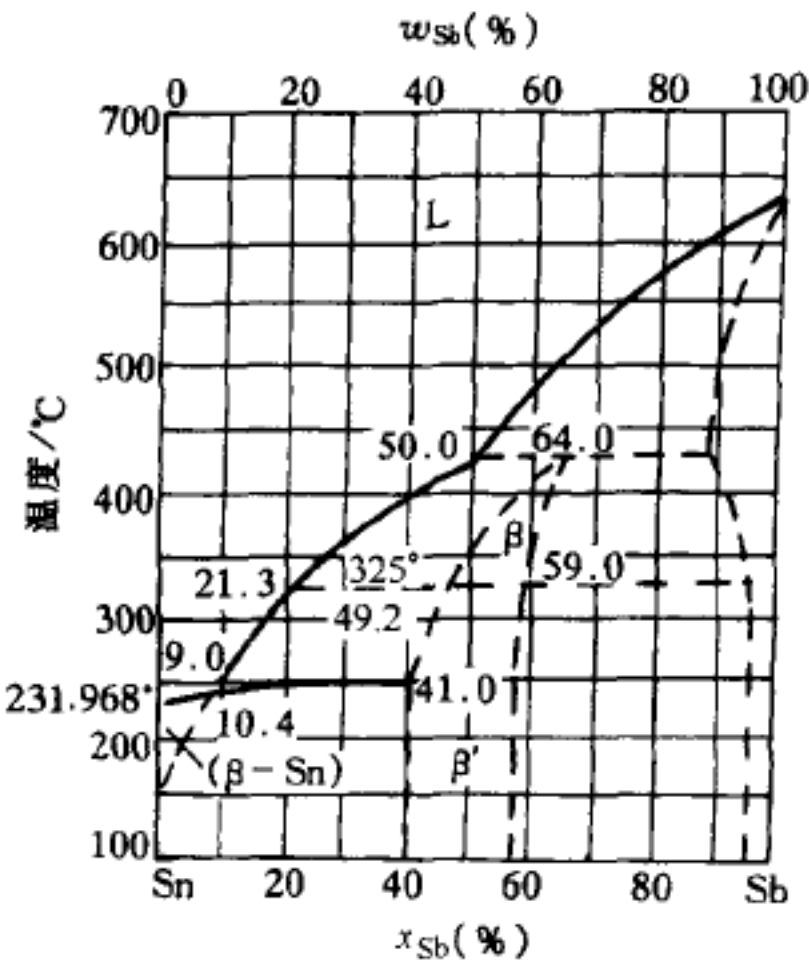


图 9-67 锡铋合金相图

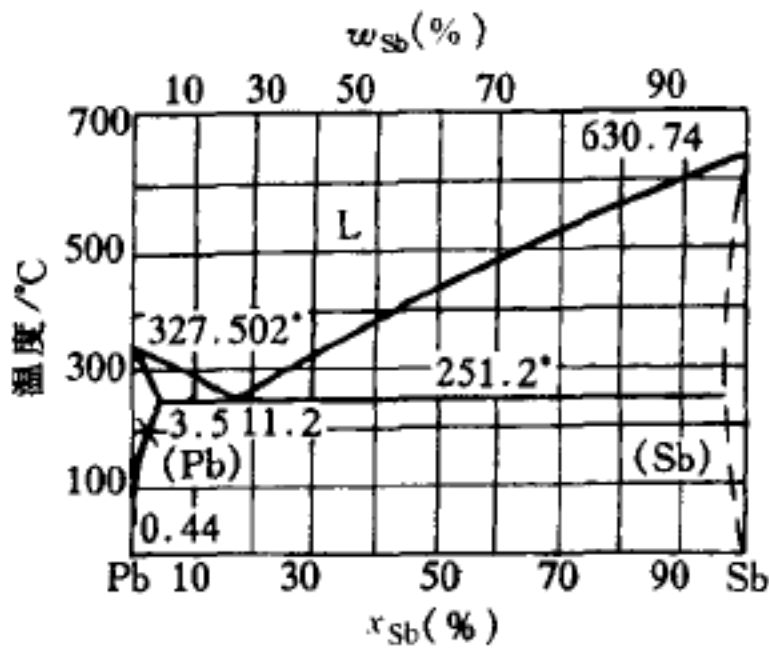


图 9-68 铅铋合金相图

表 9-170 铸造轴承合金硬度 (HBW)

温度/℃	ZChSn2	ZChSn4	ZChPb1	ZChPb2	ZChPb3	温度/℃	ZChSn2	ZChSn4	ZChPb1	ZChPb2	ZChPb3
17~20	30.0	22.0	34.0	32.0	26.0	75	18.5	12.7	21.2	—	—
25	29.0	—	—	—	—	100	14.5	9.2	15.0	14.0	—
50	22.8	16.4	29.5	24.9	24.8	125	10.9	6.9	12.1	—	—
70	19.4	—	22.8	21.3	22.1	150	8.2	6.4	8.1	—	—

表 9-171 ZChSn2 合金不同温度下的力学性能

温度/℃	σ_b /MPa	δ (%)	ψ (%)	σ_{bc} /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	a_K /J·cm ⁻²	E/MPa
15	90	6.0		120	91	6.3	63400
100	54	15.2	26.3	61	55	6.8	56800
150	32	8.4	13.5	55	44	6.7	55000

表 9-172 ZChPb1 合金不同温度下的力学性能

温度/℃	σ_b /MPa	δ (%)	ψ (%)
20	78	0.2	
80	61	1.0	
100	55	0.4	
150	42	2.4	6.1
200	25	7.0	18.5

表 9-173 锡基和铅基轴承合金耐蚀性比较

溶液及耐蚀性	ZChSn2	ZChPb1
在 HCl 1% 溶液中腐蚀速度	0.14	0.27
在 KOH 1% 溶液中腐蚀速度	0.08	1.19
在 NaCl 3% 溶液中腐蚀速度	0.08	0.52
在润滑油中腐蚀速度	0.11	0.17

注:腐蚀速度单位:g/(m²·d)

表 9-174 铸造轴承合金性能

性 能	ZChSn2	ZChSn4	ZChPb1	ZChPb2	ZChPb3
σ_b /MPa	90	80	78	68	60
$\sigma_{0.2}$ /MPa	67	—	—	—	58
δ (%)	60	70	0.2	0.2	18
σ_{bc} /MPa	115	90	123	136	128
$\sigma_{-0.2}$ /MPa	82	30	86	83	62
σ_{-1} /MPa	25	—	23	—	—
a_K /J·cm ⁻² 有缺口	6.0	—	—	—	2.6
无缺口	10.7	—	1.4	1.5	4.4
摩擦系数 μ 有润滑	0.005	—	0.006	0.005	0.009
无润滑	0.28	—	0.25	—	0.38
密度 ρ /g·cm ⁻³	7.38	7.34	9.29	9.6	—
熔点/℃ 固相点	240	—	240	232	240
液相点	370	223	410	416	400
流动性/mm	73	—	54	—	—
线收缩率(%)	0.08	—	0.06	0.05	—
线胀系数 α /×10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹	23.0	—	24.0	28.0	—

表 9-175 各种轴承合金性能比较

轴承合金	抗烧伤性	磨合性	耐蚀性	耐疲劳性	合金硬度 HBW	轴最小硬度 HBW	最大容许压力 /MPa	最高容许温度 /℃
铸铁	差	劣	优	优	160~180	200~250	3~6	150
锡青铜	中	劣	优	优	50~100	200	7~20	200
黄铜	中	劣	优	优	80~150	200	7~20	200
磷青铜	劣	劣	优	优	100~200	300	15~60	250
锡基巴氏合金	优	优	优	劣	20~30	150	6~10	150
铅基巴氏合金	优	优	中	劣	15~30	150	6~80	150
镉基合金	优	良	劣	差	30~40	200~250	10~14	250
铅青铜	中	差	差	良	40~80	300	20~32	220~250
铝合金	劣	中	优	良	45~50	300	20~28	100~150

9.8 铅合金的性能(图 9-69 和图 9-70,表 9-176 ~ 表 9-182)

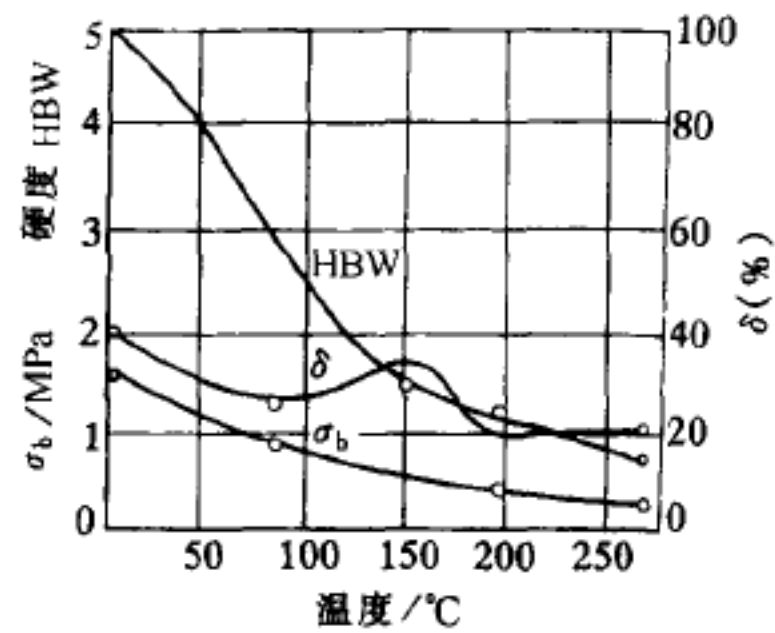


图 9-69 温度对纯铅力学性能的影响
(变形,100℃退火)

表 9-176 纯铅的力学性能

E /MPa	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_{-1} ($N=10^7$) /MPa	δ (%)	HBW
15000 ~ 17000	10 ~ 30	5.0	4.2	40 ~ 50	4 ~ 6

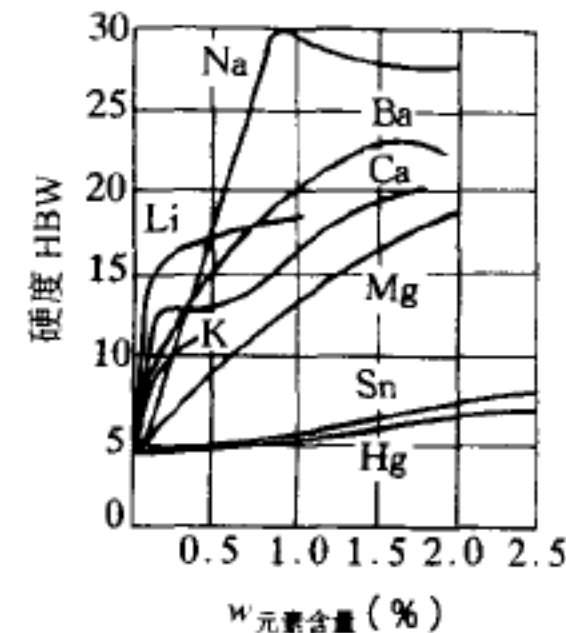


图 9-70 各元素对铅硬度的影响

表 9-177 纯铅在低温时力学性能

温度/℃	σ_b /MPa	δ (%)
17	28	26
- 196	45	34
- 253	71	36

注:铸造的,纯度为 $w_{Pb}99.98\%$ 铅。

表 9-178 纯铅物理性能

密 度 ρ /g·cm ⁻³	熔点 /℃	比热容 c (20℃) /× 4.2J·(g·℃) ⁻¹	电阻率 ρ (0℃) /× 10 ⁻² Ω·mm ² ·m ⁻¹	电阻温度系数 /× 10 ⁻³ ·℃	热导率 λ (20℃) /× 0.42kW·(m·K) ⁻¹	线胀系数 α (0~100℃) /× 10 ⁻⁶ ·℃
11.34	327.3	0.0306	18.8	4.2	0.083	29.3

表 9-179 铅的腐蚀速度 (mm/a)

环 境	纯 铅	铋 铅
城市(工业区)大气	6.9×10^{-4}	5.3×10^{-4}
农村大气	4.8×10^{-4}	3.3×10^{-4}
海洋性大气	5.6×10^{-4}	5.1×10^{-4}

表 9-180 铅铋合金的力学性能

性 能	制品种类	代 号				
		PbSb1	PbSb4	PbSb6	PbSb8	PbSb9
σ_b /MPa	铸造的	23.9	39.4	47.8	52.0	52.0
	轧制的	21.1	28.1	29.5	32.3	33.0
	挤压的	20.4	21.8	23.2	23.2	—
δ (%)	铸造的	16	22	24	19	—
	轧制的	50	50	50	30	20
	挤压的	58	58	65	75	—
HBW	铸造的	7	10	12	13	15
	轧制的	6	8	9	9	9
	挤压的	5	9	11	12	—

(续)

性能	制品种类	代 号				
		PbSb1	PbSb4	PbSb6	PbSb8	PbSb9
σ_{-1} /MPa ($N=2\times 10^7$)	轧制的 挤压的	8.4 —	10.6 —	10.6 8.4	12.3 —	12.7 —
30℃,每小时变形量 $/\times 10^{-4}\text{mm}$ 蠕变强度/MPa	轧制的 挤压的	0.18 2.5	0.18 1.9	0.28 —	0.28 —	0.28 —

表 9-181 铅锡合金高温力学性能

代号	状态	σ_b /MPa			HBW		
		室温	100℃	200℃	室温	100℃	200℃
PbSb6	铸造的	48.1	24.6	6.0	13	6.8	2
	冷轧的	28.8	13.0	4.2	—	3.9	16

表 9-182 特硬铅力学性能

代 号	状 态	σ_b /MPa	δ (%)	HBW
PbCu0.05—0.05	铸造的	25	48	5
PbSb6—0.01—0.5	铸造的	61	13	16
PbSb7—0.01—0.5	铸造的	76	21	19

9.9 钨、钼、钽、铌及其合金的性能(表 9-183 ~ 表 9-187,图 9-71)

表 9-183 钨、钼、钽、铌及其合金主要化学成分和用途

金属及合金	主 要 成 分	主 要 特 点	用 途 举 例
钨及其合金	纯钨($w_w 99.95\%$)	熔点高、密度大、热膨胀系数小、高温强度好,可用铜、镍钎焊接合	高温炉加热元件及隔热屏,X射线靶和坩埚,氢原子焊枪电极,高压整流器元件,灯泡丝
	W-10Mo, W-15Mo, W-20Mo, W-30Mo	高温强度好,随钨含量的增多高温强度增加,塑性减低	穿管芯棒,钢铁压铸模具,电真空仪器引入线,钨丝与钼丝或钨钼丝作测高温热电偶
	W-1ThO ₂ , W-2ThO ₂ , W-(10~70)Cu, W-(10~70)Ag	电子发射性能强,导电,导热性好,耐磨	各种高温电极,放电管阴极,电触点合金
	W-6Ni-4Cu W-5Ni-3.5Cu W-2.5Ni-2.5Fe	密度高,对 α 和 γ 射线吸收能力强	α 射线和 γ 射线防护屏
	W-(3~17)-Co(45~65)-Cr-(20~35)-C(0.5~2.7)	高强度、高耐磨和耐酸性(司太立特合金)	堆焊在发动机阀、电铲、冲模、涡轮叶片、热剪床刀片等严重磨损的工作部分
钼及其合金	纯钼($w_{Mo} 99.9\%$)	室温有塑性,再结晶温度较低	加热元件,隔热屏、高温零件、耐酸设备衬里,电子管引出线
	Mo-0.5Ti-0.02C	比纯钼强度高,室温有塑性	穿管心棒,压铸模具,高温卡头,宇航零件
	Mo-1.25Ti-0.15Zr-0.15C Mo-0.5Ti-0.3Zr-0.15C	强度、硬度高	穿管心棒,压铸模具,高温卡头,宇航零件

(续)

金属及合金	主要成分	主要特点	用途举例
钽及其合金	纯钽 ($w_{Ta}99\%$)	塑性好,耐蚀	高温炉加热元件,化工设备衬里,坩埚
	Ta-10W	强度高,塑性好	火箭喷嘴
	Ta-8W-2Hf-0.03C Ta-10W-2.5Hf-0.1C	强度高,塑性好	宇航零件
铌及其合金	纯铌 ($w_{Nb}99.8\%$)	室温塑性和耐蚀性好	尼龙丝喷头
	Nb-10W-1Zr-0.1C	中等强度,塑性好	原子能包壳材料,冷却管道,燃烧室前部
	Nb-30W-1Zr-0.1C Nb-28W-2Hf-0.067C	强度高,抗金属液腐蚀性好	燃汽轮机,火箭叶片
	Nb-10Hf-0.7Zr-1Ti-0.015C	强度低,塑性好	Na和K容器和管道

表 9-184 钨、钼、钽、铌室温力学性能

金属	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta(\%)$	HBW	$E/\times 10^4\cdot\text{MPa}$	泊松比 μ
W	700 ~ 4500	700 ~ 1500	1 ~ 4	200 ~ 400	35 ~ 41.5	0.33
Mo	350 ~ 2600	400 ~ 600	1 ~ 30	70 ~ 250	32 ~ 35	0.34
Ta	900 ~ 1250	—	1 ~ 40	40 ~ 350	18.8 ~ 19.2	0.35
Nb	520 ~ 900	450 ~ 600	2 ~ 30	75 ~ 250	10 ~ 13	0.38

注:数据中低值为粉末冶金制品,高值为加工产品。

表 9-185 高密度合金力学性能

合金	σ_b /MPa	$\delta(\%)$	HBW	$E/\times 10^4\text{MPa}$
W-6Ni-4Cu	750 ~ 850	4	290 ~ 310	31 ~ 33
W-5Ni-3.5Cu	≥ 700	4	290 ~ 310	31 ~ 33

表 9-186 钨、钼、钽、铌物理性能

金属	密度 ρ / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	熔点 / $^{\circ}\text{C}$	再结晶温度 / $^{\circ}\text{C}$	比热容 c / $\times 4.2$ $\text{J}\cdot(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$	热导率 λ / $\times 0.42$ $\text{kW}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	线胀系数 α / $\times 10^{-6}$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	电阻率 ρ / $\times 10^{-2}$ $\Omega\cdot\text{mm}^2\cdot\text{m}^{-1}$	电阻温度系数 / $\times 10^{-3}$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$
W	19.3	3380	1000 ~ 1200	0.034	0.397	4.6	24.8 ~ 26	4.83
Mo	10.22	2625	900 ~ 1176	0.066	0.34	4.9	5.27	4.71
Ta	16.67	2980	1021 ~ 1221	0.034	0.130	6.5	13.1	3.85
Nb	8.57	2468	1094	0.065	0.125	7.1	13.1	3.95

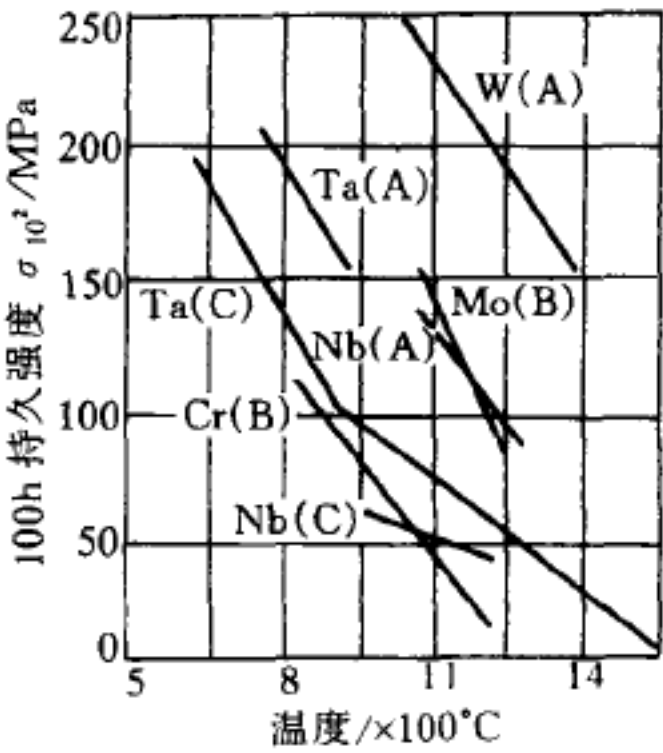


图 9-71 难熔金属持久强度
A—粉末冶金制品 B—电弧熔炼产品
C—电子束熔炼产品

表 9-187 钨、钼、钽、铌化学性能

介质条件	W	Mo	Ta	Nb
空气	室温无反应, 400℃ 开始氧化, 500℃ 迅速氧化	室温无反应, 200℃ 开始氧化, 400℃ 迅速氧化	室温无反应, 400℃ 开始氧化, 600℃ 迅速氧化	室温无反应, 200℃ 开始氧化
氧	室温无反应, 530℃ 开始生成 WO_3	室温无反应, 200℃ 氧化, 400℃ 生成 MoO_3	室温无反应, 600℃ 生成 Ta_2O_5	室温无反应
氢	无反应	无反应	低于 700℃ 吸收氢	生成氢化物
氮	2300℃ 开始生成氮化物	1500℃ 开始生成氮化物	低于 600℃ 吸收氮变脆, 1100℃ 生成 TaN	
水蒸气	高于 500℃ 迅速氧化	高于 700℃ 迅速氧化	高于 700℃ 迅速氧化	高于 700℃ 迅速氧化
稀硫酸	无反应, 热的略有腐蚀	20℃ 腐蚀轻微, 100℃ 以上腐蚀加重		加热时轻微腐蚀
稀盐酸	无反应, 热的略有腐蚀	20℃ 腐蚀轻微, 1100℃ 以上腐蚀加重	无反应	加热时轻微腐蚀
硝酸 25%	无反应	腐蚀严重	冷的无反应, 加热时生成薄膜	加热时轻微腐蚀
液体金属	在 Hg、Ag、Cu、Pb、Zn、Li、Na、K、Mg、Bi 中耐蚀	在 Hg、Ag、Cu、Pb、Li、Na、K、Mg、Bi 中耐蚀	在 Hg、Ag、Cu、Pb、Zn、Li、Na、K、Mg、Bi 中耐蚀	在 Hg、Ag、Cu、Pb、Li、Na、K、Mg、Bi 中耐蚀
熔盐	与 Na_2CO_3 、 KNO_2 、 $KClO_3$ 、 PbO_3 、 $Na_2CO_3 + NCO_3$ 作用	与 KNO_3 、 KNO_2 、 NaO_2 、 K_2CO_3 、 KCl_3 、 PbO_2 、 $Na_2CO_3 + NCO_3$ 作用	与 K_2CO_3 、 $NaHSO_4$ 作用	

9.10 非铁金属和合金的热物理性质(表 9-188 ~ 表 9-190)

表 9-188 密度、比热容、热导率和膨胀系数

牌 号	密度, ρ / $g \cdot cm^{-3}$	比热容, c_p / $J \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1}$	热导率, λ / $W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1}$	线膨胀系数, α / $\times 10^{-6} \cdot ^\circ C^{-1}$
铜及铜合金				
T2	8.90	385.19	385.19	室温, 17.7
T3	8.90	389.37	385.19	室温, 17.4
T4	8.90		385.19	室温, 17.4
H96	8.85	389.37	247.02	25 ~ 300, 18.1
H90	8.80	3768.12	167.47	25 ~ 300, 18.2
H80	8.65	389.37	142.35	25 ~ 300, 19.1
H65	8.47	3768.12	117.23	25 ~ 300, 20.1
H63	8.46		117.23	25 ~ 300, 20.2
H62	8.43		108.86	25 ~ 300, 20.6
H59	8.40		75.36	25 ~ 300, 21.6
HPb59—1	8.50		104.27	室温, 20.6
HSn70—1	8.54		108.86	室温, 20.2
HSn62—1	8.45		108.86	室温, 21.4
HA160—1—1	8.20			室温, 21.6
HMn58—2	8.50		703.34	室温, 21.2

(续)

牌 号	密度, ρ $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	比热容, c_p $/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$	热导率, λ $/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$	线膨胀系数, α $/\times 10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$
HFe59—1—1	8.50		100.48	室温, 22.0
QSn4—3	8.8		83.74	室温, 18
QSn4—0.3	8.9		83.74	室温, 17.6
QSn6.5—0.1	8.8	—	54.43	室温, 17.2
QSn6.5—0.4	8.8	—	75.36	室温, 19.1
QSn7—0.2	8.8	—	50.24	室温, 17.5
QA19—2	7.6	—	71.18	20 ~ 100, 17.2
QA19—4	7.5	—	167.47	20 ~ 100, 16.2
QA110—3—1.5	7.5	—	58.62	20 ~ 100, 16.1
QA110—4—4	7.46	—	75.36	20 ~ 100, 17.1
QA111—6—6	8.10	—	63.64	20 ~ 100, 14.9
QSi3—1	8.40	—	46.05	20 ~ 100, 15.8
QSi1—3	8.85	—	104.67	20 ~ 100, 18.0
QBe2	8.23	4.18.68	83.74 ~ 104.67	20 ~ 100, 16.6
铝及铝合金				
5A02(LF2)	2.68	100,962.94	25,154.9	- 5 ~ 20, 22.2
		200,10004.80	100,159.10	20 ~ 100, 23.8
		300,1046.67	200,163.29	20 ~ 200, 24.9
5A03(LF3)	2.67	100,962.94	25,146.53	20 ~ 100, 23.5
5A06(LF6)	2.64	100,921.07	25,117.23	20 ~ 200, 24.7
5A12(LF12)	2.74	100,1088.54	25,180.03(退火)	- 50 ~ 20, 21.6
		200,1172.27	100,180.03	20 ~ 100, 23.2
2A01(LY1)	2.76	100,921.07	25,163.29	- 50 ~ 20, 21.8
		200,1004.8	100,171.66	20 ~ 100, 23.4
2A06(LY6)	2.76	100,879.2	100,138.16	—
2A11(LY11)	2.8	100,921.07	25,117.23	- 50 ~ 20, 21.8
		200,962.94	100,129.79	20 ~ 100, 22.9
2A17(LY17)	2.84	100,795.47	100,138.16	20 ~ 100, 19.00
6A02(LD2)	2.70	100,795.47	25,175.85	- 50 ~ 20, 21.8
			100,180.03	20 ~ 100, 23.5
2B50(LD6)	2.75	100,837.34	25,163.29	20 ~ 100, 21.4
2A14(LD10)	2.80	100,837.34	25,159.10	- 50 ~ 20, 21.4
		200,879.2	100,167.47	20 ~ 100, 22.5
变形镁合金				
MB1	1.76	100,1004.8	100,125.6	20 ~ 100, 22.29
MB2	1.78	100,1004.8	100,100.48	20 ~ 100, 26.0
MB3	1.79	100,1088.54	—	20 ~ 100, 26.1
MB5	1.80	100,1730.4	100,73.27	20 ~ 100, 24.4
MB6	1.84	—	300,67.41	20 ~ 100, 23.4
MB8	1.78	—	100,133.98	20 ~ 100, 23.6
MB15	1.80	100,1034.11	100,121.42	20 ~ 100, 20.9
钛及钛合金				
工业纯钛 (T1, T2, T3)	4.5	20,544.27	20,16.33	100, 8.0
		100,544.27	100,16.33	200, 8.6
TA4	—	—	20,10.47	450, 8.2
TA5	4.43	—	—	—
TA6	4.5	100,586.135	20,7.54	450, 8.3
TA7	4.46	20,540.08	20,8.79	100, 9.36

(续)

牌 号	密度, ρ /g·cm ⁻³	比热容, c_p /J·(kg·°C) ⁻¹	热导率, λ /W·(m·°C) ⁻¹	线膨胀系数, α /×10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹
TA7		100,540.08	20,9.63	100,9.40
Ti—6Al—4V	4.43	—	—	20 ~ 100,8.6 20 ~ 650,9.7
Ti—7Al—4Mo	4.48	—	—	20 ~ 100,9.0 20 ~ 815,11.2
Ti—5Al—25Sn	4.48	—	—	20 ~ 100,9.4 20 ~ 815,10.1
镍及镍合金				
NMn3	8.90	—	53.17	13.4
NMn5	8.76	—	48.15	13.7
NCr9	8.70	—	—	1.28
NCr10	8.70	—	—	0 ~ 100,1.28
NCu28—2.5—1.5	8.80	531.71	20.93	0 ~ 100,14.0

表 9-189 某些合金的熔点

合 金	熔点/°C	合 金	熔点/°C
铝焊料,硬	> 540	伍德合金	70
铝焊料,软	250 ~ 500	(50Bi, 12.5Cd, 12.5Sn)	
防锈铝(Al, Ag, Si)	630 ~ 650	工业纯钛	1668
黄铜	900	TA7	1538 ~ 1649
青铜	≈ 900	超导合金	
铜焊料	1160 ~ 1230	NbTi	1800 ~ 2000
德尔他合金	≈ 950	NbZr	1800 ~ 2000
(56Cu, 41Zn, 1Fe, Mn, Pb)		触头合金	
杜拉铝(Al, Cu, Mg)	520 ~ 650	铂铱 20	1815
硬焊料	820 ~ 915	钨银 40	1330
铝镁合金	520 ~ 630	金银 30	1025
劳塔尔合金(Al, Cu)	650	金银 90	965
铝锰合金	650	银 100	961
蒙乃尔合金	1315 ~ 1350	钨 100	3370
德银	950 ~ 1180	钨钼 5	3165
洛斯合金	94	电热合金	
(50B, 2.5Pb, 25Sn)		Cr20Ni80	1400
硅铝合金	570	Cr15Ni60	1390
锡基焊料	181 ~ 271	1Cr13Al4	1450
(25—90Sn, 75—10Pb)		0Cr13Al6Mo2	1500
银焊料	720 ~ 855	0Cr25Al5	1500
		0Cr27Al7Mo2	1520

表 9-190 特殊用途金属、合金热物理性质

牌 号	密度, ρ /g·cm ³	比热容, c_p /J·(kg·°C) ⁻¹	热导率, λ /W·(m·°C) ⁻¹	线胀系数, α /10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹
永磁合金				
铝镍 10	7.0	—	—	20 ~ 300,11.2
铝镍 13	7.2	—	—	20 ~ 300,11.2
铝镍 32	7.4	—	—	—
烧结铝镍 9	13.0	—	—	20 ~ 300,6.7 ~ 6.8

(续)

牌 号	密度, ρ /g·cm ³	比热容, c_p /J·(kg·°C) ⁻¹	热导率, λ /W·(m·°C) ⁻¹	线胀系数, α /10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹
铁氧体 15—35	9.0	—	—	20 ~ 300, 4.5 ~ 5.2
电热合金				
Cr20Ni80	8.4	493.60	20 ~ 1000, 16.70	20 ~ 100, 14.4
Cr5Ni60	8.2	460.53	20 ~ 1000, 12.56	20 ~ 100, 10.8
1Cr13Al4	7.4	489.84	20 ~ 1000, 14.65	20 ~ 100, 15.4
0Cr13Al6Mo2	7.2	494.03	20 ~ 1000, 13.61	20 ~ 100, 15.6
0Cr25Al5	7.2	494.03	20 ~ 1000, 12.79	20 ~ 100, 16.0
0Cr27Al7Mo2	7.2	494.03	20 ~ 1000, 13.72	20 ~ 100, 16.0
触头合金				
铂铱 20	21.6	—	17.46	—
钯银 40	11.0	—	31.0	—
金银 30	16.6	—	66.99	—
金银 90	11.4	—	159.04	—
银	10.5	—	415.77	—
钨 100	19.3	—	169.80	—
钨钼				
超导合金				
NbTi	5.6 ~ 6.0	4.2K, 0.996 ~ 3.592(S)	4.2K, 0.12	4.2K, 2×10^{-2}
NbZr	5.8 ~ 8.0	4.2K, 0.996 ~ 1.398(S)	4.2K, 0.02	4.2 ~ 473K, 5.4 (20 ~ 100°C)
双金属片				
5J11	7.8	主动层 460.53	—	主动层, 27.0 被动层, < 1.8
5J18	8.1	主动层 460.53	—	主动层, 18.1 被动层, < 1.8
5J24	8.4	主动层 460.53	—	主动层, 10.11 被动层, < 1.8
5J101	8.2	主动层 460.53	—	主动层, 18.1 被动层, < 1.8

注:(S)表示超导态。

第 10 章 功能合金的热处理

10.1 磁性合金的热处理(表 10-1 ~ 表 10-15,图 10-1 ~ 图 10-10)

1. 软磁合金(表 10-1 ~ 表 10-9,图 10-1 ~ 图 10-9)

表 10-1 电磁纯铁的牌号、成分、主要性能和应用特点

牌 号	主要成分(质量分数)(%)不大于 ^①					主要磁性能				应用特点
	C	Si	P	S	Al	H_c / $A \cdot m^{-1}$ 不大于	μ_m 不小于		$B_{25}/T^{\text{②}}$ 不小于	
							/ $H \cdot m^{-1}$	/ $G \cdot Oe^{-1}$		
DT3 DT3A	0.04	0.20	0.020	0.020	0.50	96 72	7.5×10^{-3} 8.75×10^{-3}	6000 7000	1.62	不保证磁时效 的一般电磁元件
DT4 DT4A DT4E DT4C	0.03	0.20	0.020	0.020	0.15 ~ 0.50	96 72 48 32	7.5×10^{-3} 8.75×10^{-3} 11.25×10^{-3} 15×10^{-3}	6000 7000 9000 12000	1.62	在一定时效工 艺下,保证无时 效的电磁元件
DT5 DT5A	0.04	0.20 ~ 0.50	0.020	0.020	0.30	96 72	7.5×10^{-3} 8.75×10^{-3}	6000 7000	1.62	不保证磁时效 的一般电磁元件
DT6 DT6A DT6E DT6C	0.03	0.30 ~ 0.50	0.020	0.020	0.30	96 72 48 32	7.5×10^{-3} 8.75×10^{-3} 11.25×10^{-3} 15×10^{-3}	6000 7000 9000 12000	1.62	在一定时效工 艺下,保证无时 效,磁性范围较 稳定的电磁元件

① 其余为 Fe。

② 磁场强度为 2500A/m 时的磁感应强度。

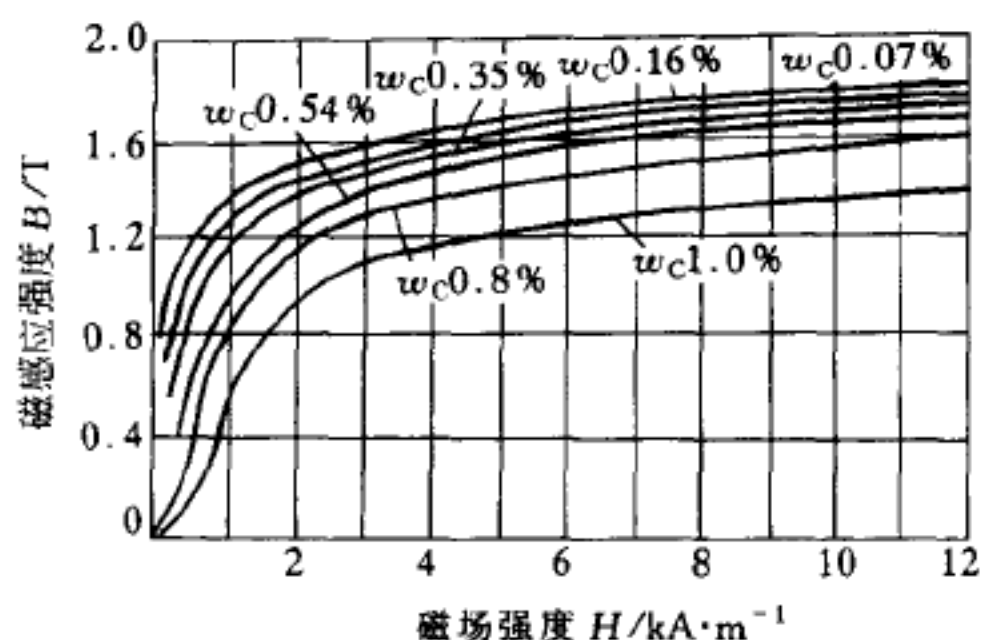


图 10-1 碳对纯铁磁化曲线的影响

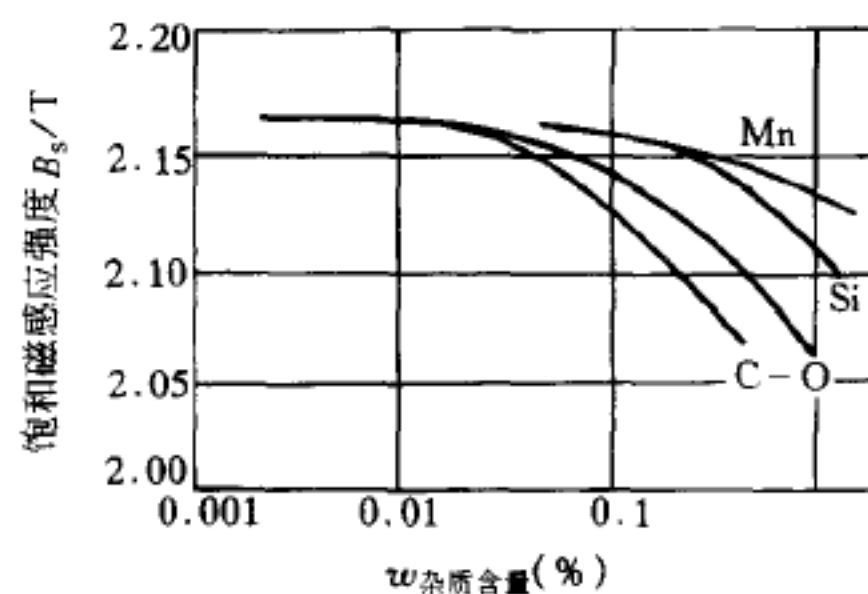


图 10-2 杂质对纯铁饱和磁感应强度的影响

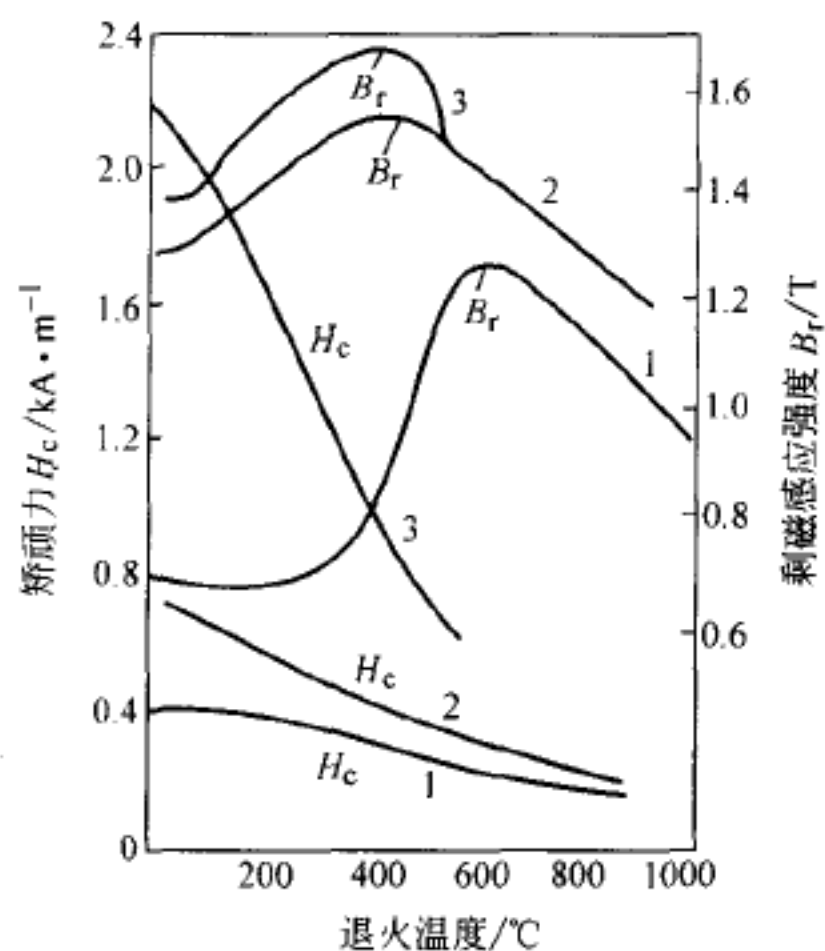


图 10-3 冷加工纯铁的磁性能与退火温度的关系
压缩率:1—45% 2—94% 3—99.9%

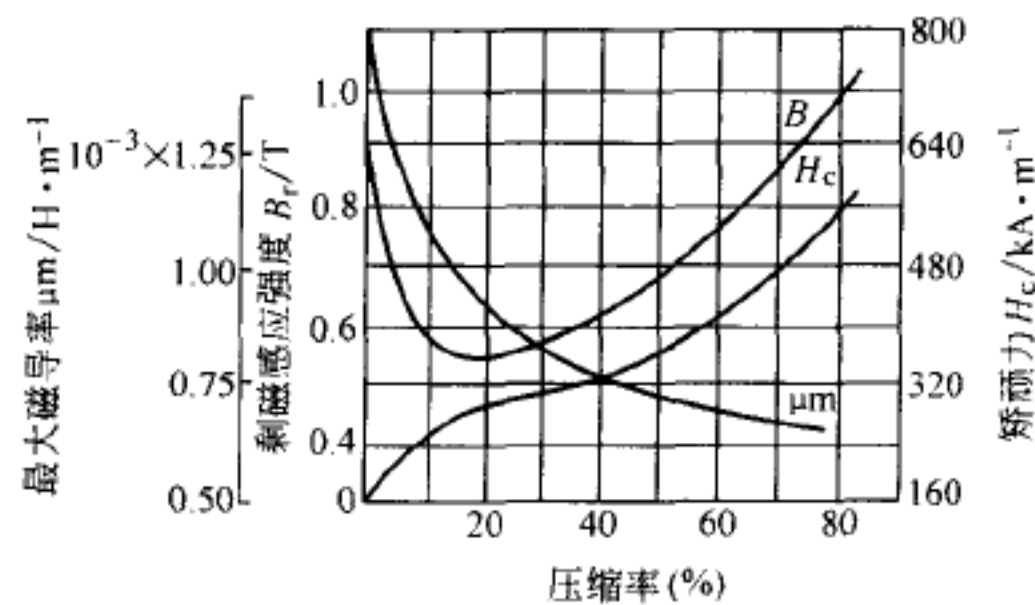


图 10-4 冷变形对工业纯铁磁性能的影响

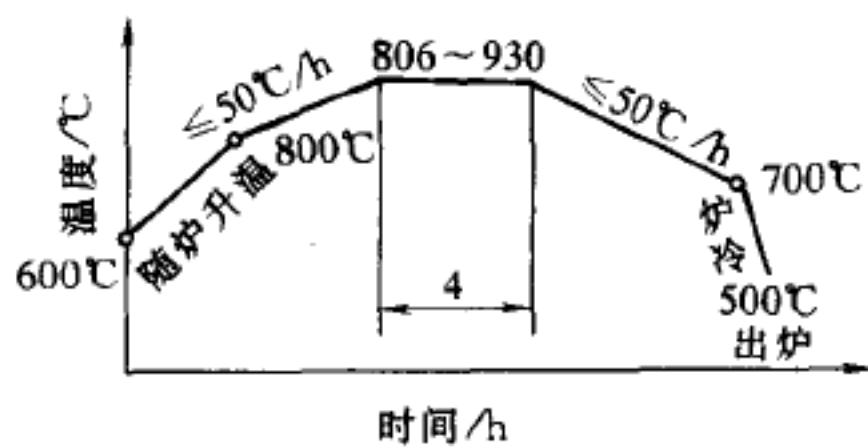


图 10-5 电工用纯铁的去应力退火工艺曲线

表 10-2 电工用硅钢片的磁性能

钢牌号	磁感应强度 B_{25}/T	单位质量铁损 $P_{10/50}/W \cdot kg^{-1}①$	钢牌号	磁感应强度 B_{25}/T	单位质量铁损 $P_{10/50}/W \cdot kg^{-1}①$
热轧硅钢片 ($\delta = 0.5mm$)			低取向度冷轧硅钢片 ($\delta = 0.5mm$)		
D11	1.53	3.20	D1100	1.53	3.30
D12	1.50	2.80	D1200	1.53	2.80
D21	1.48	2.50	D1300	1.55	2.50
D22	1.51	2.20	D3100	1.50	1.70
D31	1.46	2.00	D3200	1.48	1.50
D32	1.50	1.80	取向冷轧硅钢片 ($\delta = 0.5/0.35mm$)		
D41	1.45	1.60	D310	1.70/1.70	1.15/0.90
D42	1.45	1.35	D320	1.80/1.80	1.05/0.80
D43	1.44	1.20	D330	1.85/1.85	0.95/0.70

① 用 50Hz 反复充磁到最大磁感应强度达 1T 时的单位质量铁损。

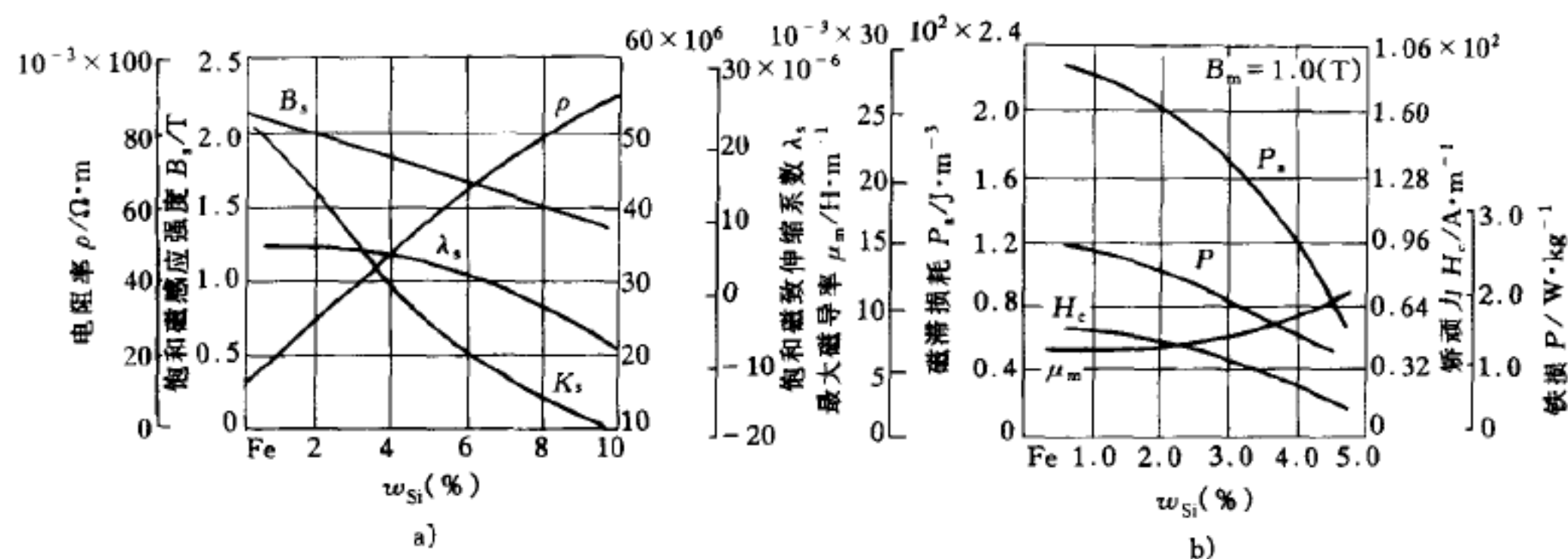


图 10-6 硅含量对电工用硅钢磁性能的影响

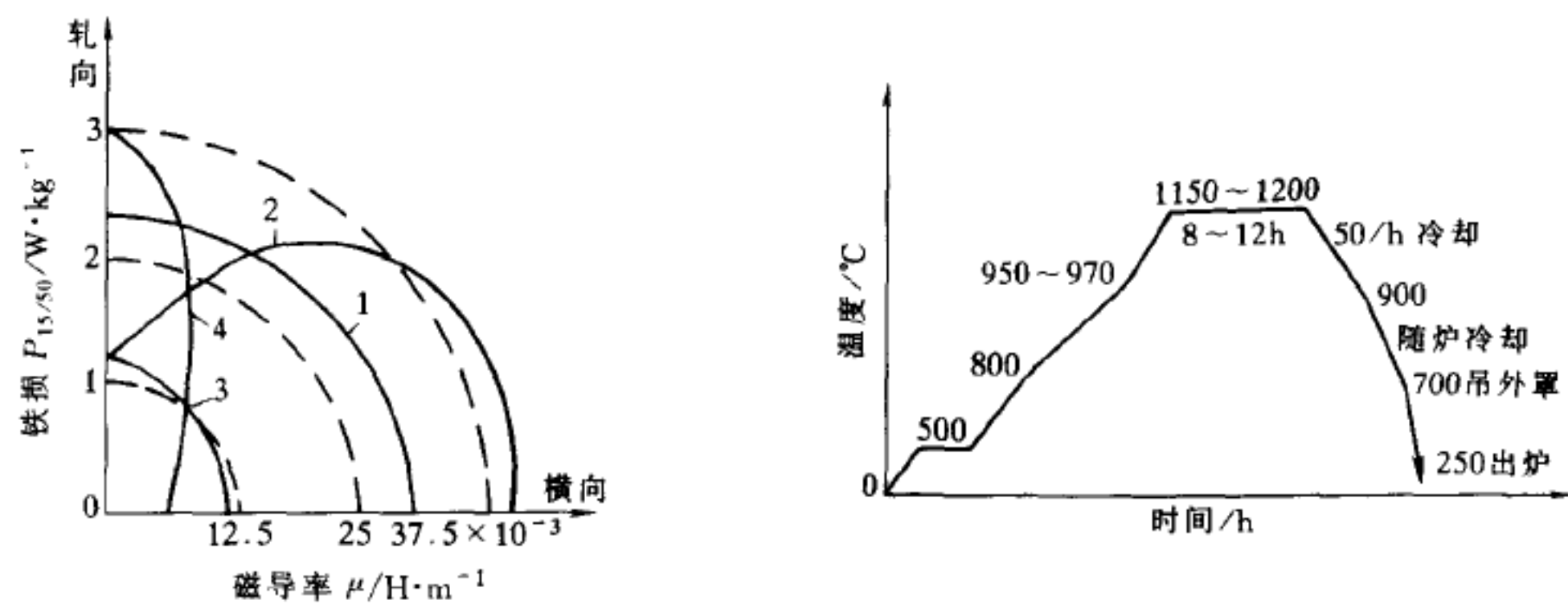


图 10-7 热轧和冷轧取向硅钢片的磁性与取向的关系

- 1—热轧无取向硅钢片 ($w_{Si} 4\%$) 的 $P_{15/50}$
- 2—冷轧单取向硅钢片的 $P_{15/50}$
- 3—热轧无取向硅钢片在 1T 时的 μ 值
- 4—冷轧单取向硅钢片在 1T 时的 μ 值

图 10-8 单取向硅钢片最终退火工艺曲线

表 10-3 铁镍合金的类型、性能特点和主要用途

类型	牌号	镍含量 (%)	磁 性 能 特 点	主 要 用 途
1J50 类	1J46 1J50 1J54	36 ~ 50	饱和磁感应强度高,磁导率低和矫顽力较大	中小功率变压器,扼流圈和控制微电机等的铁心
1J51 类	1J51 1J52 1J34	34 ~ 50	具有晶粒取向或磁畴取向(磁场热处理后),沿易磁化方向磁化具有矩形磁滞回线。其他磁性能与 1J50 类相近	中小功率的,高灵敏度的磁放大器,中小功率的脉冲变压器和记忆元件
1J65 类	1J65 1J67	~ 65	磁场热处理后获得磁畴取向,沿易磁化方向直流磁导率最高,磁滞回线呈矩形,但磁性不稳定	中等功率的磁放大器和扼流圈,计算机的记忆元件,但合金的电阻率低,不宜在较高的频率下使用

(续)

类型	牌号	镍含量(%)	磁性能特点	主要用途
1J79 类	1J79 1J80 1J83 1J76	74 ~ 80	在低磁场下有很高的最大磁导率,初始磁导率仅次于 1J85 类合金,矫顽力也很低,但饱和磁感应强度不高	在低磁场下使用的高灵敏性的小型功率变压器,小功率磁放大器、继电器、扼流圈和磁屏蔽等
1J85 类	1J85 1J86 1J77	80 81 77	具有最高的初始磁导率,极低的矫顽力和很高的最大磁导率,对微弱信号反应灵敏,电阻率比 1J79 类高,但饱和磁感应强度低,应力对磁性的影响很明显	仪表和电信工业中作扼流圈,音频变压器,高精度电桥变压器、互感器、快速磁放大器以及精密电表中的动片和定片
1J66 (恒磁)类	1J66	~ 65	横向磁场热处理后具有磁畴取向,在相当宽磁场,一定宽的温度和频率范围内磁导率不变	各种用途的恒电感,中等功率的单极性脉冲变压器等

表 10-4 铁镍合金的主要成分和磁性能(厚度 0.05 ~ 0.09mm)

牌号	主要成分 ^① (%)	μ_1 不小于		μ_m 不小于		H_0 不小于	E_s 不小于	B_r/B_m ($H = 80\text{A/m}$) 不小于	T_0 ($^{\circ}\text{C}$)	ρ $/\mu\cdot\Omega\cdot\text{cm}$
		$/\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$	$/\text{G}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	$/\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$	$/\text{G}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	$/\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$	$/\text{T}$			
1J46	Ni46	2.875×10^{-3}	2300	27.5×10^{-3}	22000	24	1.5		480	45
1J50	Ni50	3.5×10^{-3}	2800	35×10^{-3}	28000	20	1.5		500	45
1J51	Ni50			62.5×10^{-3}	50000	16	1.5	0.9	500	45
1J65	Ni65			187.5×10^{-3}	150000	4.8	1.3	0.9	600	25
1J34	Ni34Co29Mo3			112.5×10^{-3}	90000	9.6	1.5	0.9	610	50
1J54	Ni50Cr4Si	2.5×10^{-3}	2000	25×10^{-3}	20000	16	1		360	90
1J79	Ni79Mo4	22.5×10^{-3}	18000	137.5×10^{-3}	110000	2.8	0.75		460	55
1J80	Ni80Cr3Si	25×10^{-3}	20000	112.5×10^{-3}	90000	3.2	0.65		330	62
1J85	Ni80Mo5	35×10^{-3}	28000	137.5×10^{-3}	110000	2.4	0.7		400	56
1J77	Ni77Cu4Mo5	37.5×10^{-3}	30000	175×10^{-3}	140000	2	0.6		—	62
1J76	Ni76Cu5Cr2	22.5×10^{-3}	18000	125×10^{-3}	100000	3.2	0.75		—	65
1J67	Ni65Mo2			250×10^{-3}	200000	4.8	1.2	0.9	560	47
1J52 ^②	Ni50Mo2			87.5×10^{-3}	70000	16	1.4	0.9	500	60
1J83	Ni80Mo3	8.75×10^{-3}	7000	187.5×10^{-3}	150000	2.4	8.2	0.8	480	50
1J86	Ni81Mo6	50×10^{-3}	40000	187.5×10^{-3}	150000	1.44	0.6		400	70
1J66 ^②	Ni65Mo1	感应磁导率 $\mu_0 \geq 3.75 \times 10^{-3} \geq 3000$				交流稳定值 $\alpha \approx \leq 7(\%)$		交直流稳定值 $\alpha \approx \leq 6(\%)$		温度稳定值 $\alpha_T \leq 5(\%)$

① 其余为 Fe。

② 厚度 0.05 ~ 0.10mm。

表 10-5 铁镍合金的热处理工艺

合金牌号	退火介质	加热温度及速度	保温时间	冷 却 制 度
1J46 1J50 1J79	氢气或真空	1050 ~ 1150℃随炉升温	3 ~ 6h(根据尺寸 与装炉量定)	以 100 ~ 200℃/h 速度冷却到 300℃出炉
1J51	氢气或真空	1050 ~ 1100℃随炉升温	1h	以 100 ~ 200℃/h 速度冷却到 300℃出炉
1J65	氢气或真空	1000 ~ 1150℃随炉升温	3 ~ 6h(根据尺寸 与装炉量而定)	以 100 ~ 200℃/h 速度冷却到 300℃出炉
1J34	第二步氢气	650 ~ 700℃	1 ~ 2h	在 1200 ~ 1600A/m 磁场中以 30 ~ 100℃/h 速度冷却 到 200℃出炉
1J54	氢气或真空	1100 ~ 1150℃随炉升温	3 ~ 6h(根据尺寸 与装炉量而定)	以 100℃/h 速度冷却到 300℃出炉
1J80	氢气或真空	1100 ~ 1150℃随炉升温	3 ~ 6h(根据尺寸 与装炉量而定)	以 100 ~ 200℃/h 速度冷却到 400℃出炉
1J85	氢气或真空	1100 ~ 1200℃随炉升温	3 ~ 6h(根据尺寸 与装炉量而定)	以 100 ~ 200℃/h 速度冷却到 480℃,再快冷到 400℃出炉
1J77	氢气或真空	1100 ~ 1200℃随炉升温	3 ~ 6h	以 100 ~ 150℃/h 冷却到 500℃,然后以 30 ~ 50℃/h 冷却到 300℃出炉
1J76	氢气或真空	1100 ~ 1150℃随炉升温	3 ~ 6h	以 100℃/h 冷却到 500℃,然后以 10 ~ 50℃/h 冷却 到 300℃出炉
1J67	氢气或真空	1100 ~ 1150℃随炉升温	3 ~ 6h	以 100 ~ 200℃/h 冷却到 600℃,炉冷到 300℃
	第二步氢气	650℃随炉升温	1h	在 1200 ~ 1600A/m 恒磁场中以 30 ~ 100℃/h 冷却到 200℃出炉
1J52	氢气或真空	1050 ~ 1150℃随炉升温	1h	以 100 ~ 200℃/h 冷却到 600℃,炉冷到 300℃出炉
1J83	氢气或真空	1050 ~ 1150℃随炉升温	3 ~ 5h	以 100 ~ 200℃/h 冷却到 600℃,炉冷到 300℃出炉
1J86	氢气或真空	1100 ~ 1200℃随炉升温	3 ~ 6h	以 100℃/h 冷却到 600℃,然后以 30 ~ 100℃/h 冷却 到 300℃出炉
1J66	第一步氢气	1200℃随炉升温	3h	以 100℃/h 冷却到 600℃,再炉冷到 300℃出炉
	第二步氢气	650℃随炉升温	1h	在大于 16000A/m 的横向磁场中以 50 ~ 100℃/h 冷 却到 200℃出炉

表 10-6 铁铝合金的牌号、特点和用途

牌号	铝含量范围 (%)	特 点	主 要 用 途
1J6	5.5 ~ 6.0	在铁铝合金中有最高的饱和磁感应强度其磁性能不如硅钢片, 但有较好的耐蚀性能	微电机, 电磁阀的铁心
1J12	11.6 ~ 12.4	其磁导率和饱和磁感应强度介于 1J6 与 1J16 之间, 与 1J50 属于同类型的合金, 有高的电阻率和抗应力, 耐辐照的能力等	控制微电机、中等功率的音频变压器、脉冲变压器和继电器等的铁心
1J13	12.8 ~ 14.0	与纯镍相比, 饱和磁感应强度高, 矫顽力低, 饱和磁致伸缩系数接近, 但抗腐蚀性能不如纯镍	水声和超声器件, 如超声清洗, 超声探伤、研磨、焊接等器件
1J16	15.5 ~ 16.3	在铁铝合金中, 它的磁导率最高, 矫顽力最低, 但饱和磁感应强度不高	在低磁场下工作的小功率变压器, 磁放大器, 互感器, 磁屏蔽等

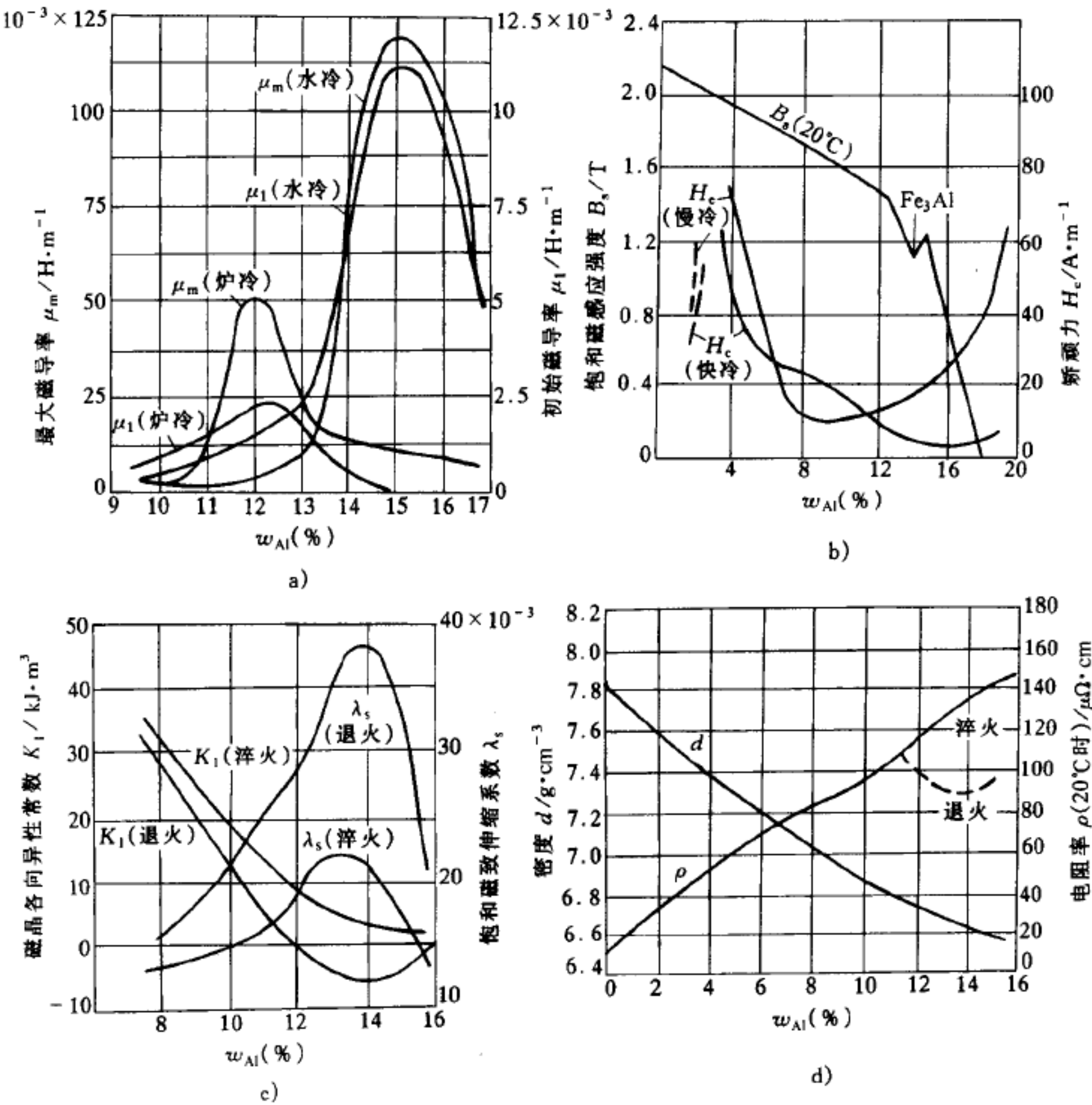


图 10-9 铁铝合金主要磁性能和有关性能(a、b、c、d)随含量的变化

表 10-7 铁铝合金的主要磁性能

牌号	厚度 /mm	$\mu_{0.4}$		μ_m		$H_c/A \cdot m$
		$/H \cdot m^{-1}$	$/G \cdot Oe^{-1}$	$/H \cdot m^{-1}$	$/G \cdot Oe^{-1}$	
1J6	0.35			$3.75 \sim 7.5 \times 10^{-3}$	3000 ~ 6000	32 ~ 48
1J12	0.2 ~ 0.5			$1.88 \sim 62.5 \times 10^{-3}$	15000 ~ 50000	5.6 ~ 12
1J13				$6.25 \sim 12.5 \times 10^{-3}$	5000 ~ 10000	48 ~ 57.6
1J16	0.35	$5 \sim 10 \times 10^{-3}$	4000 ~ 8000	$62.5 \sim 125 \times 10^{-3}$	50000 ~ 100000	1.6 ~ 2.4

牌号	B/T	B_r/T	$S/\mu \cdot \Omega \cdot m$	d $/g \cdot cm^{-3}$	$T_c/^\circ C$
1J6	$B_{25} = 1.35 \sim 1.50$	$B_{32} = 0.25 \sim 0.50$	70 (退火后)	7.2	730
1J12	$B_{32} = 1.10 \sim 1.30$		100 (退火后)	6.7	655
1J13	$B_{24} = 1.005 \sim 1.10$		$\begin{cases} 90 \text{ (退火后)} \\ 125 \sim 130 \text{ (淬火后)} \end{cases}$	6.6	510
1J16	$B_{24} = 0.65 \sim 0.75$	$B_{24} = 0.27 \sim 0.35$	140 ~ 160 (淬火后)	6.5	400

注： $\mu_{0.4}$ 表示磁场强度为0.4A/m时的磁导率值； B_{24} 、 B_{25} 、 B_{32} 和 B_{24} 、 B_{32} 分别表示磁场强度为24、25、32、24、32A/m时的磁感应强度和剩磁感应强度值。

表 10-8 铁铝合金带软化处理工艺

牌 号	使用炉子	处理介质	升 温	软化温度/ $^\circ C$	保温时间/h	冷 却
1J12 1J19 1J16	一般马弗炉	空 气	随 炉	550 ~ 750	1 ~ 3	空 冷 油 冷 水 冷

表 10-9 铁铝合金的热处理工艺

牌 号	退火气氛	加热温度/ $^\circ C$	保温时间/h	冷 却 速 度
1J6	氢气或真空	950 ~ 1050 随炉升温	2 ~ 3	以 100 ~ 150 $^\circ C/h$ 冷却到 250 $^\circ C$ 出炉
1J12	氢气或真空	1050 ~ 1200 随炉升温	2 ~ 3	以 100 ~ 150 $^\circ C/h$ 冷却到 500 $^\circ C$ ，快炉冷(吹风)至 200 $^\circ C$ 以下出炉
1J13	空气或氢气	900 ~ 950 随炉升温	2	以 100 $^\circ C/h$ 冷至 650 $^\circ C$ ，再以不大于 60 $^\circ C/h$ ，冷却到 200 $^\circ C$ 以下出炉
1J16	氢气或真空	950 ~ 1150 随炉升温	2	炉冷(时间 40 ~ 70min)或 100 ~ 150 $^\circ C/h$ 冷至 600 ~ 700 $^\circ C$ 在冰水、水、油或其他介质中淬火

2. 永磁合金的热处理(表 10-10 ~ 表 10-15,图 10-10)

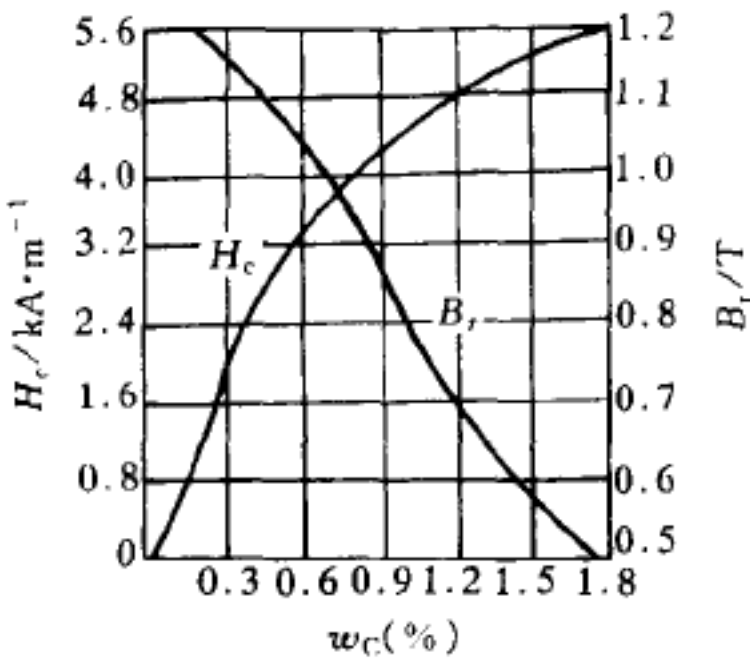


图 10-10 碳钢的磁性能与碳含量的关系

表 10-10 常用铬钢、钨钢、钴钢的成分、热处理及磁性能

序号	主要成分(质量分数)(%)				热 处 理				主 要 性 能		
	C	Cr	W、Mo	Co	正 火	高温回火	淬 火	时 效	H_c /A·m ⁻¹	B_r /T	$(BH)_m$ /kJ·m ⁻³
1	0.9 ~ 1.1	2.8 ~ 3.6	—	—	1000 ~ 1050℃, 10 ~ 15min, 水冷	—	800 ~ 840℃, 10 ~ 20min, 油冷或随后水冷和油冷	室温下空气中 24h, 然后 100 ~ 120℃ 回火 4 ~ 5h	4800	0.95	2.40
2	0.68 ~ 0.78	0.3 ~ 0.5	5.2 ~ 6.2W	—	1000℃, 5 ~ 10min, 空冷	—	800 ~ 840℃, 15min, 水冷或空冷	室温下空气中 24h, 然后以 100 ~ 120℃ 回火 4 ~ 5h	4800	1.00	2.64
3	0.9 ~ 1.05	5.5 ~ 6.5	—	5.5 ~ 6.5	1200℃, 15min 空冷	700℃, 1h 空冷	930 ~ 980℃, 15min, 油冷	100 ~ 120℃, 4 ~ 5h	7200	0.85	3.20
4	0.9 ~ 1.05	8 ~ 10	1 ~ 1.7Mo	13.5 ~ 16.5	1200℃, 5 ~ 10min, 空冷	700℃, 1h 空冷	1000℃, 10min 油冷或空冷	100 ~ 120℃, 4 ~ 5h	12000	0.80	4.16

表 10-11 我国铁镍铝铸造永磁合金的牌号、成分和性能

牌号	各向同性 或 各向异性	成分(质量分数)(%)							永 磁 特 性			备 注
		Al	Ni	Co	Cu	Ti	Si	Fe	H_c /kA·m ⁻¹	B_r /T	$(BH)_m$ /kJ·m ⁻³	
LN8	同性	13.5	34				1	余	57	0.45	8	各向同性 FeNiAl 合金
LN10	同性	13	25.5		3			余	36	0.60	10	各向同性 FeNiAl 合金
LNG13	同性	10	21	12	6			余	48	0.75	13	—
LNG13	同性	9.5	20	15	3.5			余	48	0.70	13.1	—
LNG20	异性	10	19	18	3			余	52	0.90	20	—
LNG34	异性	8	14	24	3			余	47	1.20	34	相当于等轴晶 AlNiCo5
LNG52	异性	8	14	24	3			余	56	1.30	52	相当于柱状晶 AlNiCo5
LNG32	异性	7	15	34	3	5		余	100	0.80	32	相当于等轴晶 AlNiCo8
LNCT56	异性	7	15	34	4	5		余	104	0.95	56	相当于柱状晶 AlNiCo8
LNCT72	异性	7	15	34	4	5		余	107	1.05	72	相当于柱状晶 AlNiCo8

表 10-12 铸造铁镍铝和铝镍钴永磁合金的典型热处理工艺

合金类型	固溶处理温度 /℃	冷却速度/℃·min ⁻¹		磁场处理	回火级数与制度
		v_{c1} (在 800℃左右)	v_{c2} (在 800 ~ 500℃范围内)		
FeNiAl (AlNi 型)	1100 ~ 1200	空气或沸水	空气或沸水	—	—
AlNiCo	1200 ~ 1250	> 100 ~ 150	< 15 ~ 20	—	—
AlNiCo (各向异性)	1250 ~ 1300	> 150 ~ 200	< 15 ~ 20	在 830 ~ 750℃ 范围内加磁场	600℃, 2h ^①

(续)

合金类型	固溶处理温度 /℃	冷却速度/℃·min ⁻¹		磁场处理	回火级数与制度
		v_{c1} (在 800℃左右)	v_{c2} (在 800 ~ 500℃范围内)		
AlNiCoCu (各向异性) AlNiCoCu (定向结晶)	1250 ~ 1300	> 200 ~ 300	< 10 ~ 15	在 830 ~ 750℃范 围内加磁场	二级回火; (I) 630 ~ 660℃, 2h (II) 530 ~ 560℃, 6 ~ 10h
AlNiCoCuTi (各向异性) AlNiCoCuTi (定向结晶)	1200 ~ 1230	> 200 ~ 300	—	800 ~ 820℃保温 15 ~ 20min, 加磁场	多级回火; (I) 680℃, 2h (II) 660℃, 2h (III) 640℃, 4h (IV) 560℃, 10 ~ 12h (V) 530℃, 6h

① 钴含量低于 12% ~ 15%时无需回火。

表 10-13 各向异性铁钴钒磁滞合金的回火制度

牌 号	成分(质量分数)(%)	回 火 制 度
2J3	Co48, V3.5	620 ~ 660℃, 保温 20 ~ 30min, 空气冷却
2J4	Co45, Ni6, V4	600 ~ 660℃, 保温 20 ~ 30min, 空气冷却
2J7	Co52, V7	
2J9, 2J10	Co52, V9, Co52, V10	580 ~ 660℃, 保温 20 ~ 30min, 空气冷却
2J11, 2J12	Co52, V11; Co52, V12	580 ~ 640℃, 保温 20 ~ 30min, 空气冷却

表 10-14 几种常用铁铬钴合金的热处理和磁性能

成分(质量分数)(%)	热 处 理 制 度	B_r /T	$H_c/A \cdot m^{-1}$	$(BH)_m / kJ \cdot m^{-3}$
Fe-31Cr-23Co	1300℃, 30min 固溶处理 640℃, 40min 磁场处理 600℃, 1h; 580℃, 2h 分级时效	1.16	48000	33
Fe-28Cr-23Co-1Si	1300℃, 30min, 固溶处理 630℃, 1h 磁场处理 600℃, 2h; 580℃, 4h 分级时效	1.30	46000	42
Fe-30Cr-25Co-3Mo	1300℃, 30min, 固溶处理 630℃, 30min 磁场处理 600℃, 2h; 580℃, 4h 分级时效	1.15	62000	40
Fe-21Cr-15Co-3V-2Ti	1100℃, 1h, 固溶处理 670℃, 1h, 磁场处理 620℃, 1h; 600℃, 1h; 580℃, 1h 560℃, 1h; 540℃, 5h 多级时效	1.40	46000	48

表 10-15 几种铂钴合金的成分、热处理和磁性能

序 号	成分(x%) ^①						热 处 理 制 度	$H_c / kA \cdot m^{-1}$	B_r / T	$(BH)_m / kJ \cdot m^{-3}$
	Pt	Co	Pd	Fe	Ni	Cu				
1	17.5	52.5	—	—	—	—	1000℃水淬, 600℃时效保温 15 ~ 50min	312	0.79	93.6
2	49	51	—	—	—	—	1000℃加热水淬, 600℃时效 保温 20 ~ 60min	400 ~ 416	0.7 ~ 0.72	96 ~ 100
3	48 ~ 45	50	2 ~ 5	—	—	—	1000℃加热, 以 14 ~ 20℃/min 冷速冷至 600℃, 保温 1 ~ 5h	320 ~ 400	0.62 ~ 0.72	76 ~ 84

(续)

序号	成分(x%) ^①						热 处 理 制 度	H_c /kA·m ⁻¹	B_r /T	$(BH)_m$ /kJ·m ⁻³
	Pt	Co	Pd	Fe	Ni	Cu				
4	20~50	20~50	—	5~10	—	—	900℃加热,620℃等温淬火, 600~650℃时效	320~352	0.77~0.8	84
5	49.5	44.5	—	5	1	—	900℃加热,620℃等温淬火, 600~650℃时效	—	—	108
6	49.45	44.5	—	5	1	0.05	900℃加热,620℃等温淬火, 600~650℃时效	—	—	116

① 即 mol%,下同。

10.2 膨胀合金的热处理(表 10-16 ~ 表 10-31,图 10-11)

表 10-16 低膨胀合金的成分和性能

合金名称	主要成分(质量分数) (%)	线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	居里点 $T_c / ^\circ\text{C}$	$\gamma \rightarrow \alpha$ 相变温度/ $^\circ\text{C}$
因瓦(4J36)	36Ni-Fe	1.2	232	-120
超因瓦(4J32)	4Co-32Ni-Fe	0.0	230	-100
不锈因瓦	11Cr-52Co-Fe	0.0	117	—
铁铂合金	25Pt-Fe	-30	80	-70
铁钯合金	31Pd-Fe	0.0	340	—
锰钯合金	35.5Mn-Pd	1.5	—	—
无磁因瓦	5.5Fe-0.5Mn-Cr	~0.0	T_N ^① ~ 50	—

① 奈尔点。

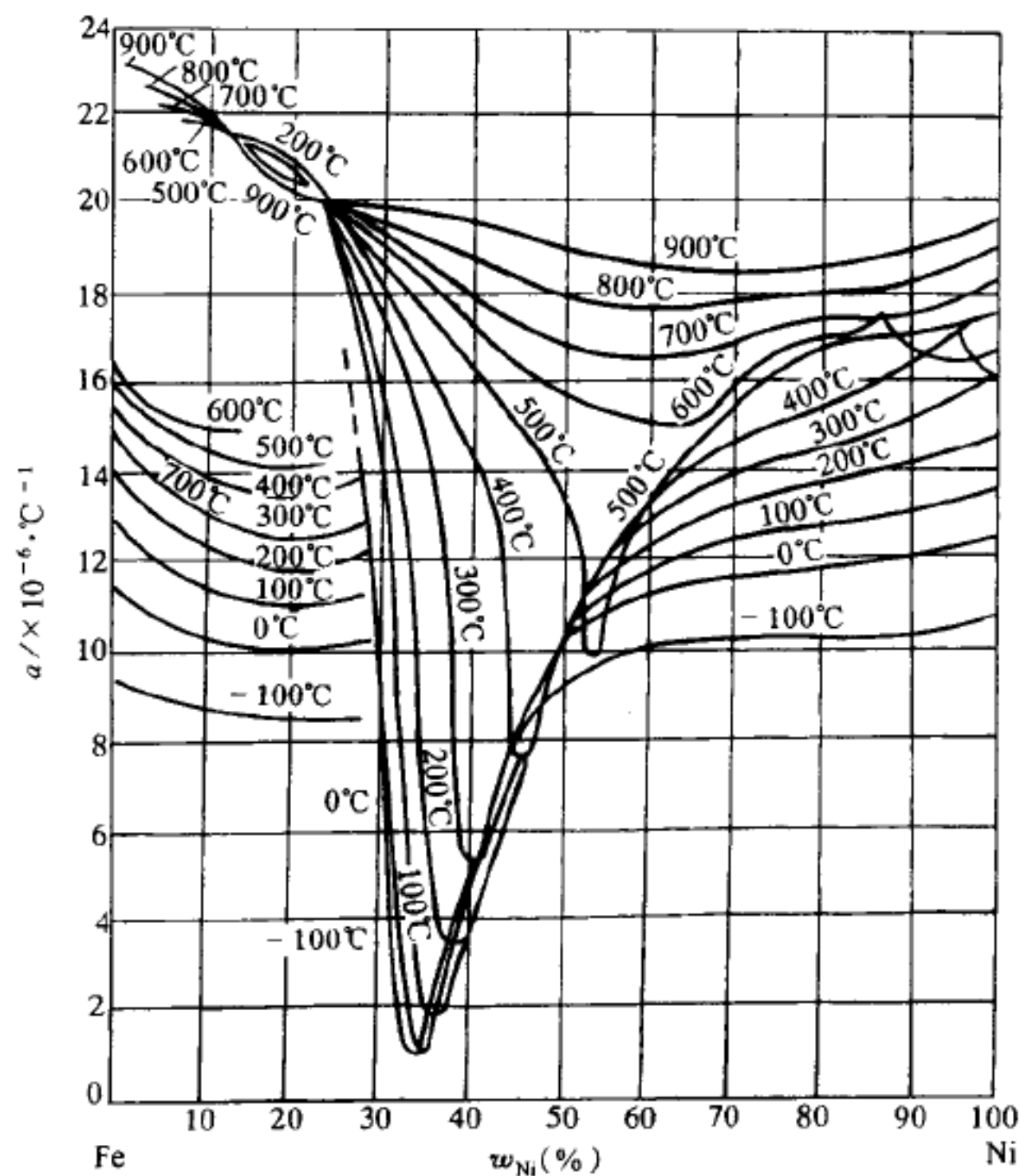


图 10-11 铁镍合金在不同温度下的热膨胀系数

表 10-17 4J36 合金的化学成分和膨胀系数

化学成分 (质量分数)(%)	C	P	S	Mn	Si	Ni	Fe
	≤0.05	≤0.02	≤0.02	≤0.6	≤0.3	35.0~37.0	余量
膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	-120~18℃	-40~21℃	0~21℃	21~100℃	21~200℃	21~300℃	21~400℃
	1.98	1.76	1.58	1.40	2.45	5.16	7.80

表 10-18 热处理和冷变形对 Ni36 合金热膨胀系数的影响

热处理和冷变形条件		$\alpha / \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	
		$\alpha_{17 \sim 100^\circ\text{C}}$	$\alpha_{17 \sim 250^\circ\text{C}}$
热锻后		1.66	3.11
850℃固溶处理		0.64	2.53
850℃固溶处理再时效		1.02	2.43
由 850℃经 19h 冷至室温		2.01	2.89
850℃退火		1.709	
冷拔	变形量 30%	0.126	
	变形量 47.2%	-0.233	
	变形量 57.2%	-0.33	
	变形量 65.5%	-0.36	

表 10-19 几种低温因瓦合金的成分

牌 号	化学成分(质量分数)(%)						
	Ni	Mn	Si	C	Cu	Cr	Fe
Ni36Cr	36	0.45	0.3	0.05	0.25	0.5	余量
Ni36Cu	36	0.5	<0.5	<0.15	<0.5	—	余量
Ni39	39	0.4	0.25	0.05	—	—	余量

表 10-20 Ni36Cr 合金的低温膨胀系数

状态及热处理制度	膨 胀 系 数 $\alpha / \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$									
	-269	-253	-248	-223	-196	-173	-123	-73	-23	27
63%冷变形	-0.4	-2.0	-2.3	-0.8	0.5	1.2	1.3	0.8	0.4	0.6
淬 水	—	—	—	—	1.0	1.4	1.6	1.2	0.7	0.9
淬水 + 315℃ × 1h 回火	—	—	—	—	1.0	1.5	1.9	1.4	0.9	1.1
950℃空冷	—	—	—	—	1.0	1.7	2.1	1.6	1.3	1.5
950℃炉冷	—	—	—	—	0.9	1.6	2.2	1.8	1.5	1.8
600℃, 5h 退火, 冷到 100℃, 保温 90h	—	-1.5	-1.8	0.3	1.5	2.1	2.6	2.5	2.2	2.5

表 10-21 铁镍钴超因瓦合金中不同镍、钴含量时的膨胀系数

合金成分(质量分数) (%)	Co	0	3.5	4	4	4	5	5	6	6
	Ni	36.5	34	32.5	33	33.5	31.5	32.5	30.5	31.5
	Co + Ni	36.5	37.5	36.5	37	37.5	36.5	37.5	36.5	37.5
$\alpha_{20 \sim 100^\circ\text{C}} / \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$		1.2	0.3	~0	0.4	0.5	~0	0.5	~0	0.1

表 10-22 4J32 超因瓦合金的化学成分和膨胀系数

化学成分(质量分数) (%)	C	P	S	Si	Mn	Ni	Co	Cu	Fe
	0.020	0.003	0.004	0.08	0.27	32.2	3.7	0.62	余量
膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	20 ~ -60℃	20 ~ -20℃	20 ~ 0℃	16 ~ 100℃	16 ~ 200℃	16 ~ 300℃	16 ~ 400℃	16 ~ 500℃	16 ~ 600℃
	-0.92	-0.69	-0.74	0.86	2.01	4.88	7.70	9.61	10.80

表 10-23 热处理工艺对 4J32 超膨胀合金性能的影响

热处理类型	去应力退火	恢复塑性退火	尺寸稳定化	退 火	淬火 + 回火
热处理工艺	530 ~ 550℃	830 ~ 880℃	空气中加热到 830℃ × 20min 淬水, 在还原气氛中加热到 315℃ × 60min 空冷, 最后 95℃ × 48h	在保护气或真空中加热到 (850 ~ 900℃) × 60min, 以小于 300℃/h, 速度冷至 200℃ 以下出炉	在保护气中加热到 (850 ~ 900℃) × 90min 淬火, 加热到 (300 ~ 320℃) × 4h, 以 < 80℃/h 速度冷至 80℃ 以下出炉
膨胀系数	—	—	—	$\alpha_{20 \sim 100^\circ\text{C}} \leq 1.5 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	$\alpha_{20 \sim 200^\circ\text{C}} \leq 1.2 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

表 10-24 4J32 合金退火和淬火状态下的热膨胀系数 ($\alpha \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)

炉号 热处理 温度范围	A		B		C	
	退 火	淬 火	退 火	淬 火	退 火	淬 火
室温 ~ 50℃	0.83	0.22	0.94	0.31	0.86	0.25
室温 ~ 100℃	1.09	0.43	1.19	0.47	1.04	0.41
室温 ~ 150℃	1.44	0.80	1.57	0.87	1.31	0.80
室温 ~ 200℃	2.07	1.44	2.01	1.47	1.78	1.25

注: 退火、淬火加热温度均为 830℃。

表 10-25 4J9 合金的化学成分和膨胀系数

化学成分(质量分数) (%)	C	P	S	Si	Mn	Co	Cr	Fe
	0.024	0.005	0.08	0.08	0.20	53.35	9.10	余量
膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	21 ~ -60℃	21 ~ -20℃	21 ~ 0℃	21 ~ 100℃	21 ~ 200℃	21 ~ 300℃	21 ~ 400℃	21 ~ 500℃
	-0.61	-0.68	-0.67	0.42	5.54	8.86	11.04	12.94

表 10-26 4J9、4J32、4J36 合金的耐蚀性(比较)

牌 号	时 间	指标 腐蚀失重 $AP / \times 10^{-4} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$		
		10d	22d	42d
4J9		0.46	0.70	0.99
4J32		2.00	2.80	3.70
4J36		4.40	6.20	8.30

表 10-27 4J35 高强度因瓦合金化学成分和膨胀系数

化学成分(质量分数) (%)	C	Si	Mn	Ni	Co	Ti	Fe
	≤0.05	≤0.05	0.20~0.40	34.0~35.0	5.0~6.0	2.2~2.8	余量
膨胀系数 $\alpha/\times 10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	-100~20℃	20~100℃	20~200℃	20~300℃	20~400℃	20~500℃	
	3.0	3.6	6.2	9.2	11.2	12.5	

表 10-28 4J35 高强度因瓦合金不同热处理后的力学性能

热 处 理 工 艺	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\delta(\%)$	$\varphi(\%)$	硬度 HBW
950℃水淬	620	380	40	—	163
950℃空冷	660	400	—	—	—
加热 1100℃×2h, 以 100℃/h 速度冷至 750℃, 再以 50℃/h 冷至 650℃, 再以 20℃/h 缓冷至 550℃, 最后随炉冷	1150	1100	8	10	320

表 10-29 热双金属的组合层合金的成分和性能

合金牌号	化学成分(质量分数)(%)						物理性能			
	Ni	Cr	Fe	Cu	Mn	其他元素	膨胀系数 $\alpha(20\sim 200^{\circ}\text{C})$ $/\times 10^{-6}$ $\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	电阻率 ρ (20℃) $/\Omega\cdot\text{mm}^2$ $\cdot\text{m}^{-1}$	热导率 λ (20~200℃) $/\text{W}\cdot$ $(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	弹性模 量 E (20℃) $/\text{GPa}$
主 动 层										
Ni19Cr11 (4J19)①	18~20	10~12	余量	—	0.3~0.6	—	17	0.80	4.391	195
Ni20Mn6 (4J20)②	19~21	—	余量	—	5.5~6.5	—	19	0.78	4.510	175
3Ni24Cr2 (4J24)①	22~25	2~3	余量	—	0.3~0.6	—	18.5	0.83	4.154	190
Ni29Cr8Ti2A (28HXTIO)②	28~30	8~9	余量	—	0.3~0.6	Ti2.2~2.6 Al0.4~0.8	16	0.93	3.916	195
Cu62Zn38 (H62)①	—	—	<0.15	60.5~63.5	—	Zn 余量	20.5	0.07	30.86	110
Cu90Zn10 (H90)①	—	—	<0.10	88.0~91.0	—	Zn 余量	18.5	0.04	47.47	105
Mn75Ni15Cu10 (4J15)①	14~16	—	<0.8	9.5~11.0	余量	—	29	1.72	24.92	125
Mn70Ni25Cr5 (70THX)②	24.3~25.7	4.5~5.2	<0.8	—	余量	—	25	1.60	—	135
中 间 层										
Cu	—	—	<0.005	≥99.9	—	≤Zn0.005	17.5	0.0178	109.42	115
Ni	≥99.3	—	<0.15	<0.15	—	—	13.5	0.085	16.85	210

(续)

合金牌号	化学成分(质量分数)(%)						物理性能			
	Ni	Cr	Fe	Cu	Mn	其他元素	膨胀系数 $\alpha(20 \sim 200^\circ\text{C})$ $/\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	电阻率 ρ (20°C) $/\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	热导率 λ ($20 \sim 200^\circ\text{C}$) $/\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	弹性模量 E (20°C) $/\text{GPa}$
被 动 层										
Ni34	33.5 ~ 35.0	—	余量	—	< 0.6	—	2.6	0.86	4.629	—
Ni36(4J36) ^①	35 ~ 37	—	余量	—	< 0.6	—	1.0	0.79	4.629	150
Ni42(4J42) ^①	41 ~ 43	—	余量	—	< 0.6	—	4.8	0.60	4.747	155
Ni50(4J50) ^①	49 ~ 50.5	—	余量	—	< 0.6	—	9.8	0.43	5.815	163
Ni46(46H) ^②	45 ~ 47	—	余量	—	0.3 ~ 0.6	—	7.5	0.46	5.222	160
Ni45Cr6 (45HX) ^②	44 ~ 46	5.0 ~ 6.5	余量	—	0.3 ~ 0.6	—	8	0.90	4.272	175
Ni45Ti2Al (45HTiO) ^②	44.4 ~ 46.5	—	余量	—	0.3 ~ 0.6	Ti2.2 ~ 2.6 Al0.4 ~ 0.8	5.2	0.93	4.510	165
Ni30Co17 (30HK) ^②	29 ~ 30	—	余量	—	< 0.4	Co16.5 ~ 17.5	5.5	0.50	4.747	150

① 括号内为我国牌号。② 括号内为俄罗斯牌号。

表 10-30 我国主要热双金属和其主要性能

牌号	组合层合金			比弯曲 α (室温 ~ 150°C) $/\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	电阻率 ρ ($20 \pm 5^\circ\text{C}$) $/\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	弹性模量 E/GPa 不小于	线性温度 范围 $/^\circ\text{C}$	允许使用 温度范围 $/^\circ\text{C}$
	主动层	被动层	中间层					
5J11	Mn75Ni15Cu10	Ni36	—	18.0 ~ 22.0	1.08 ~ 1.18	130	-20 ~ 200	-70 ~ 250
5J14	Mn75Ni15Cu10	Ni45Cr6	—	14.0 ~ 16.5	1.19 ~ 1.30	140	-20 ~ 200	-70 ~ 250
5J16	Ni20Mn6	Ni36	—	13.8 ~ 16.0	0.77 ~ 0.82	160	-20 ~ 180	-70 ~ 450
5J17	Cu62Zn38	Ni36	—	13.4 ~ 15.2	0.14 ~ 0.19	110	-20 ~ 180	-70 ~ 250
5J18	3Ni24Cr2	Ni36	—	13.2 ~ 15.5	0.77 ~ 0.84	160	-20 ~ 180	-70 ~ 450
5J19	Ni20Mn7	Ni34	—	13.0 ~ 15.0	0.76 ~ 0.84	160	-50 ~ 100	-80 ~ 450
5J20	Cu90Zn10	Ni36	—	12.0 ~ 15.0	0.09 ~ 0.14	120	-20 ~ 180	-70 ~ 180
5J23	Ni19Cr11	Ni42	—	9.5 ~ 11.7	0.67 ~ 0.73	170	0 ~ 300	-70 ~ 450
5J24	Ni	Ni36	—	8.5 ~ 11.0	0.14 ~ 0.19	170	-20 ~ 180	-70 ~ 430
5J25	3Ni24Cr2	Ni50	—	6.6 ~ 8.4	0.54 ~ 0.59	170	0 ~ 400	-70 ~ 450
5J101	3Ni24Cr2	Ni36	Cu	12.0 ~ 15.0	0.14 ~ 0.18	160	-20 ~ 180	-70 ~ 250

表 10-31 热双金属成品常用稳定化热处理规范

牌 号	试样热处理规范			牌 号	试样热处理规范		
	加热温度/ $^\circ\text{C}$	保温时间/h	冷却方式		加热温度/ $^\circ\text{C}$	保温时间/h	冷却方式
5J11	260 ~ 280	1 ~ 2	空冷	5J20	150 ~ 200	1 ~ 2	空冷
5J14	260 ~ 280	1 ~ 2	空冷	5J23	380 ~ 400	1 ~ 2	空冷
5J16	300 ~ 350	1 ~ 2	空冷	5J24	300 ~ 350	1 ~ 2	空冷
5J17	150 ~ 200	1 ~ 2	空冷	5J25	400 ~ 420	1 ~ 2	空冷
5J18	300 ~ 350	1 ~ 2	空冷	5J101	230 ~ 250	1 ~ 2	空冷
5J19	300 ~ 350	1 ~ 2	空冷				

10.3 弹性合金的热处理(表 10-32 ~ 表 10-58)

表 10-32 铁镍铬高弹性合金的成分、性能和用途

合 金 ^①	主要化学成分(质量分数)(%) ^②					最高工 作温度 /℃	线膨胀系数 $\alpha/\times 10^{-6}\cdot$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	密度 ρ / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	电阻率 ρ / $\Omega\cdot\text{mm}^2\cdot$ m^{-1}	性能特点和用途
	Ni	Cr	Ti	Al	Mo					
Ni36CrTiAl (3J1)	34.5 ~ 36.5	11.5 ~ 13.5	2.8 ~ 3.2	0.9 ~ 1.2	—	200	12 ~ 14	7.9	0.9 ~ 1.0	热处理后弹性良好,耐蚀性和工艺性能较好,用于膜片(盒)波纹管,弹簧管,螺旋弹簧以及压力传感器的传送杆,转子发动机刮片弹簧等
Ni36CrTiAlMo5 (3J2)	34.5 ~ 36.5	11.5 ~ 13.5	2.8 ~ 3.2	0.9 ~ 1.2	5.4 ~ 6.5	300	12 ~ 14	8.0	1.0 ~ 1.1	耐热性较好,从室温到 300℃,强度下降不超过 4%,其他同 3J1
Ni36CrTiAlMo8 (3J3)	34.5 ~ 36.5	11.5 ~ 13.5	2.8 ~ 3.2	0.9 ~ 1.2	7.5 ~ 8.5	350	12 ~ 14	8.3	1.0 ~ 1.1	耐热性更好,从室温到 500℃,强度下降不超过 11%,其他同 3J1

① 括号内为我国牌号。② 其余成分为 Fe。

表 10-33 铁镍铬高弹性合金的热处理和力学性能

合 金	推荐的热处理规范	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ (%)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	弹性极限 σ_e /MPa	弹性模量 E /GPa	弹性模量 温度系数 $\beta/\times 10^{-6}$ $\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	硬度 HV
Ni36CrTiAl (3J1)	淬火:920 ~ 980℃,水冷 软回火:650 ~ 720℃,2 ~ 4h 硬回火:600 ~ 650℃,2 ~ 4h	750 ~ 800 > 1200 > 1400	35 ~ 40 > 8 > 5	250 ~ 400 850 ~ 1100 1300	800 ^① 900 ^①	175 ~ 215 180 ~ 220	100	150 ~ 180 340 ~ 360 360
Ni36CrTiAlMo5 (3J2)	淬火:980 ~ 1000℃,水冷 软回火:750℃,2 ~ 4h 硬回火:700℃,2 ~ 4h	850 ~ 900 1250 ~ 1400 1400	30 ~ 35 8 ~ 10 5	500 ~ 600 900 ~ 1100 1300	850	190	100	200 ~ 215 420 ~ 450 450
Ni36CrTiAlMo8 (3J3)	淬火:980 ~ 1050℃,水冷 软回火:750℃,2 ~ 4h 硬回火:700℃,2 ~ 4h	900 ~ 950 1400 ~ 1450 1400	20 ~ 25 6 ~ 7 5	600 ~ 650 1100 ~ 1150 1300	950	210	100	200 ~ 230 485 ~ 495 495

① 为弯曲弹性极限。

表 10-34 冷变形铁镍铬合金回火后的力学性能

合 金	热处理规范	σ_b /MPa	σ_s /MPa	$\sigma_{0.005}$ /MPa	δ (%)	HB
Ni36CrTiAl (3J1)	950℃,水淬 > 50%冷变形 700℃,2h回火	1400 ~ 1650	1300 ~ 1450	1120 ^①	8 ~ 12	330 ~ 350
Ni36CrTiAlMo5 (3J2)	980℃,水淬 > 50%冷变形 750℃,4h回火	1400 ~ 1750	1300 ~ 1600		5 ~ 10	400 ~ 420
Ni36CrTiAlMo8 (3J3)	1000℃,水淬 > 50%冷变形 750℃,4h回火	1400 ~ 1900	1300 ~ 1600	1300 ^②	5 ~ 10	420 ~ 450

① 50%冷变形,700℃回火 0.5h。② 50%冷变形,750℃回火 0.25h。

表 10-35 冷变形铁镍铬高弹性合金的回火规范

合 金	合 金 状 态	回 火 制 度
Ni36CrTiAl	淬火带材	650 ~ 700℃, 2 ~ 4h
	淬火后冷轧带材	600 ~ 650℃, 2 ~ 4h
	淬火后冷拔丝材	600 ~ 650℃, 2 ~ 4h
Ni36CrTiAlMo5 和 Ni36CrTiAlMo8	淬火合金	700 ~ 750℃, 4h
	淬火后冷变形合金	650 ~ 700℃, 4h

表 10-36 铁镍铬合金经各种热处理后的性能

Ni36CrTiAl 合金				Ni36CrTiAlMo8 合金			
热处理规范	$\sigma_{0.002}$ /MPa	δ (%)	HV	热处理规范	$\sigma_{0.002}$ /MPa	δ (%)	HV
常规热处理				常规热处理			
950℃, 2min 水淬	350	38	180	1000℃, 2min 水淬	500	22	220
700℃, 2h 回火	800	15	380	700℃, 2h 回火	1000	6	430
形变热处理				形变热处理			
950℃, 2min 水淬	350	38	180	1000℃, 2min 水淬	500	22	220
50% 冷变形	580	8	330	50% 冷变形	820	4	380
700℃, 0.25h 回火	1150	2	435	700℃, 0.25h 回火	1300	3	540
二次淬火形变热处理				二次淬火形变热处理			
950℃, 2min 水淬	350	38	180	1000℃, 2min 水淬	500	22	220
50% 冷变形	580	8	330	50% 冷变形	820	4	380
950℃, 3s 快速淬火	820	25	345	1000℃, 3s 快速淬火	920	22	450
700℃, 0.25h 回火	1120	8	430	700℃, 0.25h 回火	1240	8	560

表 10-37 镍铍高弹性合金的成分、性能和用途

合 金 (主要成分%)	最高工作温度 /℃	线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	密 度 $\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	电阻率 ρ $/\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	主要特点和用途
NiBe2 (Be2Ni 余量)	250	13.5(硬回火)		0.35(软态) 0.10(硬回火)	室温和高温弹性优于 3J1。用于微动开关接触簧片和高温下工作的特殊弹簧等
NiBe2Ti (Be2, Ti0.5, Ni 余量)	250		8.84		合金中加入钛后, 疲劳抗力和耐蚀性更好。用途同上
NiBe2Co3W6 (Be1.7; Co3; W6, Ni 余量)	400			0.35	耐热性优于 NiBe2, 电阻温度系数较低。用途同上
NiBe2Co3W8 (Be1.7, Co3, W8, Ni 余量)	450			0.52	耐热性更高, 用途同上

表 10-38 镍铍高弹性合金的热处理和力学性能

合 金	热处理制度及合金状态	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ (%)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	弹性极限 σ_e /MPa	弹性模量 E /GPa	硬度 HV
NiBe2	软化:1020~1050℃,水冷 软回火:500~520℃,2~3h 硬回火:480~500℃,2~3h ^①	<850 1700~1830 >1700	>2.5 3.5~7.5 >3	<450 1400~1500 >1450	>1200	200 210	<250 500 >470
NiBe2Ti	软化:1020~1050℃,水冷 软回火:500℃,2~3h	1600		1400	850	200	225 500
NiBe2Co3W6	软化:1060℃,水冷 硬回火:600℃,45min	1750		1700	1640	200~210	165~185 430~560
NiBe2Co3W8	软化:1060℃,水冷 硬回火:600℃,45min	1750		1720	1650	200~210	190~220 540~590

① 以高导电性为主要指标时,热处理温度可提高至530℃。

表 10-39 镍铬铌高弹性合金

合 金	化学成分(质量分数)(%)						
	C	Cr	Nb	Mo	W	Al	Ni
Ni70CrNbMoAl	≤0.06	14~16	9.5~10.5	4~6	—	1.0~1.5	余量
Ni70CrNbMoWAl	≤0.06	14~16	9~10	3~4	1.7~2.3	0.6~1.1	余量
Ni60CrNbMoWAl	≤0.06	24~26	8~9	3~4	1.7~2.3	0.6~1.1	余量

表 10-40 镍铬铌高弹性合金的热处理规范和力学性能

合 金	热 处 理 规 范	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_{0.005}$ /MPa	$\sigma_{0.002}$ /MPa	δ (%)	HRB
Ni70CrNbMoAl	1000~1150℃,水淬 1000~1150℃淬火+750℃5h 回火	580~840 1350~1600	420~620 1200~1350	— 1100~1200	— —	32~40 8~13	93~99 45~48HRC
Ni70CrNbMoWAl	1150~1175℃,水淬 1150~1175℃淬火+750℃5h 回火	770~1000 1500~1700	450~540 1240~1460	— 1100~1200	— 950~1120	30~39 10~12	95 48HRC
Ni60CrNbMoWAl	1150℃,水淬 1150℃淬火+750℃5h回火	500~940 1350~1470	370~450 1150~1340	— 1100~1200	— 950~1070	36~42 7~12	93 45~46HRC

表 10-41 钴镍高弹性合金 Co67Ni28Nb5 的成分、热处理规范和力学性能

合 金 (主要成分)(%)	热 处 理 规 范	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_{0.005}$ /MPa	E /GPa	δ (%)	HRC
Co67Ni28Nb5 (Ni27~29, Nb4.8~5.2, Ti0.03,Co余量)	1000℃水淬	735	—	—	—	≥40	18
	1000℃水淬+35%~40%变形 +650℃,1h回火(带材)	1450~1480	1350~1370	880	186~196	2.5~5	50
	1000℃,(水淬)+40%变形+ 650℃1h回火(丝材)	1860~1960	—	—	—	2.5~3	—

表 10-42 钴铬镍钼高弹性合金的成分、性能和用途

合 金 (主要成分,质量分数)(%)	最高工作温度 /℃	线膨胀系数 α / $\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	密度 ρ / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	电阻率 ρ / $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	主要特点和用途
Co40CrNiMo(3J21) ^① (Co40, Ni15, Cr20, Mo7, Mn2, C < 0.12, Fe 余量)	400	13 ~ 16	8.3	0.9 ~ 1.0	弹性高,耐磨和耐蚀性好,能耐硫化氢腐蚀,用于精密机械的轴尖、弹簧、平膜片、发条、游丝等
Co40CrNiMoW(3J22) ^① (Co40, Ni15, Cr20, Mo3.5, W4, Mn2, C < 0.12, Fe 余量)	450	14 ~ 16	8.5	0.9 ~ 1.0	冷热加工性能比 3J21 有所改善,有较高的加工时效强化效应。用途同上
Co40CrNiMoWTiAl (3J24) ^① (Co40, Ni19, Cr12, Mo3.5, Ti2, Mn2, Al0.5, C < 0.12, Fe 余量)	400	14.0	8.5	1.0 ~ 1.1	具有很高的冷变形能力时效后组织为 γ 固溶体,金属间化合物和少量碳化物,强化效果强;软态时效也有一定强化效果。用于形状复杂的弹性元件
Co42CrNiWMoMn(YC—11) ^① (Co42, Cr17, W10, Mo4, Mn2, C < 0.08Ni 余量)	400				耐蚀、耐磨、抗冲击,丝材淬火和冷变形时,塑性优于 3J22,便于校直下料。时效温度范围宽,用于航空和电测仪表轴尖及其他弹性元件

① 括号内为我国牌号。

表 10-43 钴铬镍钼高弹性合金的热处理规范和力学性能

合 金	热处理规范与状态	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	弹性极限 σ_e /MPa	弹性模 量 E /GPa	伸长率 δ (%)	硬 度 HV	弹性模量 温度系数 $\beta / \times 10^{-6}$ $^\circ\text{C}^{-1}$
Co40CrNiMo (3J21)	软化: 1150 ~ 1180℃ 水淬 硬回火: 淬火 + \geq 70% ~ 75% 冷变形 + 500 ~ 550℃, 4h 回火, 空冷	700 ~ 800 2500 ~ 2700	2300 ~ 2500	1400 ~ 1600	200	40 ~ 50 3 ~ 5	180 ~ 200 600 ~ 700	200 ~ 250
Co40CrNiMoW (3J22)	软化: 1150 ~ 1180℃ 水淬 硬回火: 淬火 + \geq 85% 冷变形 + 500 ~ 550℃, 4h, 回火, 空冷	700 ~ 750 3000 ~ 3200	2300 ~ 2800	1650 ~ 1700	210	40 ~ 50 4 ~ 6	180 ~ 200 ≥ 750	200 ~ 250
Co40CrNiMo WTiAl (3J24)	软化: 1150 ~ 1180℃ 水淬 回火: 淬火 + 500 ~ 550℃, 4h 回火, 空冷 硬回火: 淬火 + \geq 85% 冷变形 + 500 ~ 550℃, 4h 回火, 空冷	700 ~ 800 900 ~ 1100 2000 ~ 2200	350 ~ 400 400 ~ 500 1800 ~ 2000	> 1200	220	55 ~ 60 30 ~ 40 4 ~ 6	140 ~ 160 550 ~ 600	200 ~ 250
Co42CrNiWMoMn (YC—11)	软化: 1100 ~ 1160℃ 水淬 硬态: 淬火 + 90% 冷 变形 硬回火: 淬火 + 冷变 形 + 500 ~ 600℃, 4h 回 火	950 ~ 1100		≥ 400 ≥ 1100	≥ 180 ≥ 230	≥ 40	≥ 280 ≥ 560 ≥ 804	

表 10-44 加工硬化型铜基弹性合金的成分性能和用途

合 金 (主要成分, %)	最高工作 温度/℃	线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \cdot \text{C}^{-1}$	密度 ρ / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	电阻率 ρ / $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	主要特点和用途
锡青铜 QSn6.5—0.1 (Sn6.5, P0.1, Cu 余量)	100	17.2	8.8	0.128	良好的弹性, 耐磨性, 抗磁性和焊接性, 耐大气和淡水腐蚀。用于膜片, 波纹管、簧片等
锡青铜 QSn6.5—0.4 (Sn6.5, P0.4, Cu 余量)	100	17.7	8.8	0.176	良好的弹性, 耐磨性、抗磁性和焊接性, 耐大气和淡水腐蚀。用于膜片、波纹管、簧片等, 弹性略有提高, 疲劳极限高, 耐海水腐蚀, 用于弹簧管、合金丝等
锡青铜 QSn4—3 (Sn4, Zn3, Cu 余量)		18.0	8.8	0.09	弹性低于 QSn6.5—0.1, 但冷热加工性能优良, 用于电表中游丝, 张丝等
硅青铜 QSi3—1 (Si3, Mn1, Cu 余量)		15.8	8.4	0.15	加工硬化后, 有高的屈服极限和弹性极限, 耐磨性优良, 低温下塑性不降低, 用于螺旋弹簧等
锌白铜 BZn15—20 (Ni15, Zn20, Cu 余量)		16.6	8.6	0.26	化学稳定性高, 冷热加工性能好, 弹性优于 QSn6.5—0.1 等锡青铜, 焊接性能略差, 用于弹簧管、簧片等

表 10-45 加工硬化型铜基弹性合金的热处理和力学性能

合 金	热处理规范和合金状态	抗拉强度 σ_b /MPa	弹性极限 σ_e /MPa	弹性模量 E /GPa	伸长率 δ (%)	硬度 HV
锡青铜 QSn6.5—0.1	软化: 600 ~ 650℃ 空冷	> 300			> 38	70 ~ 90
	硬 态	> 550	350 ^①	95	> 8	160 ~ 200
	特硬态	> 680	400 ^①	115	> 2	
	60% 冷变形					
	60% 冷变形 + 260℃, 1h 回复退火		550			
锡青铜 QSn6.5—0.4	软化: 600 ~ 650℃, 空冷	> 300		112	> 38	80
	硬 态	> 550			> 8	180
	特硬态	> 680			> 2	
锡青铜 QSn4—3	软化: 600℃, 空冷	> 300			> 38	60
	硬 态	> 550		124	> 3	160
	特硬态	> 680			> 2	
	60% 冷变形		440			
	60% 冷变形 + 150℃, 30min 回复退火		530			
硅青铜 QSn3—1	软化: 700 ~ 750℃, 空冷	> 380			> 45	
	硬 态	> 680		120	> 5	
	特硬态	> 750			> 2	
	60% 冷变形		380			
	60% 冷变形 + 275℃, 1h 回复退火		540			
锌白铜 BZn15—20	软化: 700 ~ 750℃, 空冷	> 360		126	> 35	77
	硬 态	> 550		140	> 1.5	183
	特硬态	> 650			> 1.0	
	60% 冷变形		600			
	60% 冷变形 + 300℃, 4h 回复退火		620			

① 弯曲弹性极限。

表 10-46 时效硬化型铜基弹性合金的成分、性能和用途

合 金 (主要成分,质量分数,%)	最高工作 温度/℃	线膨胀系数 α $/\times 10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	密度 ρ $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	电阻率 ρ $/\Omega\cdot\text{mm}^2\cdot\text{m}^{-1}$	主要特点和用途
铍青铜 QBe2 (Be2, Ni0.4, Cu 余量)	150	16.6	8.2	0.06 ~ 0.10	弹性后效较小($H_{10} < 0.2\%$),对大气海水有良好的耐蚀性,用于制造膜片、波纹管、弹簧管、游丝、张丝、簧片、耐磨零件
铍青铜 QBe1.9 (Be1.9, Ni0.3, Ti0.2Cu 余量)	150		8.3		有优越的疲劳极限,弹性极限高于 QBe2,对热处理时效的敏感性小,弹性后效 $H_{10} < 0.2\%$ 。弹性后效较小($H_{10} < 0.2\%$),对大气海水有良好的耐蚀性,用于制造膜片、波纹管、弹簧管、游丝、张丝、簧片、耐磨零件
铍青铜 QBe1.7 (Be1.7, Ni0.3, Ti0.2, Cu 余量)	150				特性大体与 QBe1.9 相似,但力学性能略低。用于制造膜片、波纹管、弹簧管、游丝、张丝、簧片、耐磨零件
钛青铜 QT3.5 (Ti3.5 ~ 1.0, Cu 余量)	150	16.6	8.6	0.12 ~ 0.57	力学性能与 QBe2 接近,成本较低,但耐蚀性和抗氧化性能较差。用于簧片、弹簧等
钛青铜 QT6—1 (Ti6, Al1, Cu 余量)	150	15.0	8.4	0.97	力学性能高于 QT3.5,成本比铍青铜低。在 10% 氯化钠中有较好的耐蚀性,耐疲劳性能好。用于簧片,弹簧等

表 10-47 时效硬化型铜基弹性合金的热处理和力学性能

合 金	热处理制度和合金状态	抗拉强度 σ_b/MPa	弹性极限 σ_e/MPa	弹性模量 E/MPa	伸长率 δ (%)	硬度 HV
铍青铜 QBe2	软化:780 ~ 800℃, 氮气保护, 水冷	400 ~ 600			> 30	< 130
	硬 态	> 650			> 2.5	> 170
	软时效:310 ~ 330℃, 2h	> 1150	750 ^①	110	> 2	> 320
	硬时效:310 ~ 330℃, 2h	> 1200	820 ^①	130	> 1.5	> 360
铍青铜 QBe1.9	软化:780 ~ 800℃, 氮气保护, 水冷	400 ~ 600			> 30	< 120
	硬 态	> 650			> 2.5	> 160
	软时效:310 ~ 330℃, 2 ~ 2.5h	> 1150	780 ^①	115	> 2	> 350
	硬时效:310 ~ 330℃, 2 ~ 2.5h	> 1200	870 ^①	135	> 1.5	> 370
铍青铜 QBe1.7	软化:780 ~ 800℃, 氮气保护, 水冷	440		107	50	< 120
	硬 态	> 600			> 2.5	> 150
	软时效:310 ~ 330℃, 2h	1150		124	3.5	> 310
	硬时效:310 ~ 330℃, 2h	> 1100		130	> 2	> 340
钛青铜 QT3.5	软化:850 ~ 900℃, 水冷	< 500		122	> 30	120 ~ 130
	冷 轧	700 ~ 900		125	2.5 ~ 4.5	230 ~ 260
	硬时效:400℃, 2h	960 ~ 1160	800	139	5 ~ 11	310
钛青铜 QT6—1	软化:850 ~ 900℃, 水冷	400 ~ 600			3.0	140
	硬 态	850		120	2.5	200
	软时效:450℃, 2h	1100	610	126	2	320
	硬时效:420℃, 2h	1200	790	128	1.5	350

① 为弯曲弹性极限。

表 10-48 几种高弹性不锈钢的成分、性能和用途

合 金 (主要成分,质量分数,%)	最高工作 温度/℃	线膨胀系数 α $/\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	密度 ρ $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	电阻率 ρ $/\Omega\cdot\text{mm}^2\cdot\text{m}^{-1}$	主要特点和用途
0Cr17Ni7Al (Cr17, Ni7, Al1, C \leq 0.09, Fe 余量)	400	(20~300℃) 17.5(固溶处理) 11.8(高温调整) 10.9(中温调整) 12.0(冷变形)	7.65~7.67	0.84~0.87	对氧化性腐蚀介质有良好的耐 蚀性,可焊接,高温性能好,用于弹 簧和结构中
0Cr15Ni7Mo2Al (Cr15, Ni7, Mo2, Al1, C \leq 0.09, Fe 余量)	430	(20~320℃) 15.3(固溶处理) 10.1(高温调整) 11.0(中温调整)	7.68~7.80	0.80~0.82	淬火后塑性优于 3J1,易加工成 深波纹膜片,回火后弹性很好,具 有特别高的蠕变强度,冷处理后回 火变形很小用于膜片,弹簧等
0Cr14Ni8Mo2Al (Cr14, Ni8, Mo2, Al1, C0. 05, Fe 余量)	425		7.68~7.95		性能与上相似,由于碳含量较 低,抗晶界腐蚀能力和韧性较高, 在 400℃ 左右有较好的高温稳定 性。用途同上
Cr12Mn5Ni4Mo3Al (Cr12, Mn6, Ni4, Mo3, Al1, C \leq 0.09Fe 余量)		(20~100℃) 16.21(固溶处理) 13.74(回火)	7.71~7.80	0.797	固溶处理后不必进行中温调整, 直接冷处理和回火,可获得良好综 合力学性能。也可在固溶处理后 经不同冷变形和回火获得很高的 强度。用于弹簧等

表 10-49 几种高弹性不锈钢的热处理及其力学性能

合 金	热处理规范与合金状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	弹性模量 E/GPa	伸长率 δ (%)	硬度 HV
0Cr17Ni7Al	固溶处理:1030~1050℃,空冷	910	280	206.5	35	165
	高温调整:同上+950~960℃	930	290		19	165
	冷处理:同上+(-73℃),8h	1230	880		9	348
	回火:同上+450~500℃,4h	1620	1520		7	470
	中温调整:750~760℃,1.5h	1020	700		9	295
	回火:同上+550~575℃,1.5h	1410	1360		6	460
	50%冷变形	1510	1300		5	430
	回火:同上+480℃,20~30min	1760	1690		2	528
0Cr15Ni7Mo2Al	固溶处理:1030~1050℃,空冷	910	380	204	30	183
	高温调整:同上+950~960℃	1050	280		12	165
	冷处理:同上+(-73℃)8h	1260	880		7	392
	回火:同上+450~550℃,4h	1690	1510		6	510
	中温调整:750~760℃,1.5h	1010	670	204	7	270
	回火:同上+550~575℃,1.5h	1470	1400		7	460
	50%冷变形	1540	1330		5	460
	回火:同上+480℃,20~30min	1860	830		2	540
0Cr14Ni8Mo2Al	固溶处理:975~1000℃,空冷	880	390		25	176
	高温调整:同上+925℃,1h					
	冷处理:同上+(-73℃),8h					
Cr12Mn5Ni4Mo3Al	回火:同上+500℃,1h	1650	1510	189 193 203 213	5	528
	固溶处理:1040~1060℃,空冷	1160			24	185
	冷处理:同上+(-78℃)	1430	1050		16	440
	回火:同上+(520 \pm 10℃),1~2h	1640	1440		16	516
	冷变形回火:冷变形+(520 \pm 10℃)1~2h	1650~2400				

表 10-50 高弹性马氏体时效钢的成分和性能

钢 号	化 学 成 分 (%)							回火 温度 ^① /℃	力 学 性 能					
	C	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Cr		σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	ψ (%)	δ (%)	HRC	a_K /MJ·m ⁻²
Ni18Co9Mo5Ti	≤0.03	17.7~ 19.0	8.5~ 9.5	4.6~ 5.5	0.5~ 0.8	0.15	—	500	2200	1950	—	8	55	0.35
Ni18Co12Mo5Ti2	≤0.03	17.0~ 18.0	11.8~ 13.2	3.3~ 4.2	1.5~ 1.9	0.20	—	500	2450	2350	35	7	60	—
Ni16Co4Mo5Ti2Al	≤0.03	15.0~ 17.0	4.0~ 5.0	4.0~ 5.0	1.5~ 1.9	0.15~ 0.35	—	480	2050	1980	40	7.5	55	0.20
Ni17Co12Mo5Ti	≤0.01	17.0~ 18.0	11.5~ 12.5	4.5~ 5.0	1.3~ 1.9	—	—	500	2050	2000	45	8	54	0.30
Ni18Co14Mo5Ti	≤0.03	17.0~ 19.0	13.0~ 15.0	4.5~ 5.5	1.1~ 1.6	0.15	—	480	2400	—	35	9	57	—
Ni18Cr12Co5Mo3Ti	≤0.03	7.0~ 9.0	5.0~ 6.0	2.0~ 3.0	0.8~ 1.2	0.15~ 0.35	11.5~ 12.5	480	1700	1600	55	10	48	0.50
Ni10Cr11Mo2Ti	≤0.03	10.5~ 11.5	—	2.0~ 3.0	0.8~ 1.2	0.15~ 0.35	9.5~ 10.5	500	1550	1480	50	8	46	0.50

① 奥氏体化温度为 880~1000℃。

表 10-51 Ni18Co9Mo5Ti 钢在不同回火温度时的弹性性能

热 处 理 制 度	弹性极限 σ_e /MPa	平均热弹性系数/ $\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	
		+20~100℃	+20~150℃
810℃, 20min 水淬 + 480℃, 3h 回火	2000	-212	-217
810℃, 20min 水淬 + 570℃, 3h 回火	1550	-172	-255
810℃, 20min 水淬 + 600℃, 3h 回火	1380	-36	-33
810℃, 20min 水淬 + 620℃, 3h 回火	1250	0	-44
810℃, 20min 水淬 + 650℃, 3h 回火	1100	-52	-58
815℃ 油淬 + 84% 变形 + 520℃, 3h 回火	2250	-160	-234
815℃ 油淬 + 84% 变形 + 550℃, 3h 回火	2050	78	-11
815℃ 油淬 + 84% 变形 + 580℃, 3h 回火	1000	-72	-43

表 10-52 Ni35CrMoW 碳化物强化时效硬化型合金的化学成分和热处理、冷变形后的强度

化学成分 (质量分数)(%)	Ni	Cr	W	Mo	C	Si	Mn	Fe
	34.3~35.7	8.5~9.5	0.55~0.85	1.8~2.2	1.14~1.20	0.2~0.4	0.8~0.9	其余
在真空中的淬火 加热温度/℃	抗 拉 强 度 σ_b /MPa							
	真空中加热淬火后				冷 变 形 后			
900	800				1150			
1000	820				1270			
1050	860				1320			

表 10-53 金属化合物弥散强化型恒弹性合金的成分、性能和用途

合 金 (主要成分,质量分数,%)	工作温度 范围 /℃	线膨胀系数 α / $\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	密 度 ρ / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	电阻率 ρ / $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	居里点 T_c /℃	主要特点和用途
Ni42CrTiA(3J53) ^① (Ni42, Cr5.5, Ti2.0, Al0.75, Co0.05, Fe 余量)	-40 ~ 80	8.3	8.4	1.0 ~ 1.1	115 ~ 120	低的弹性模量温度系数与频率温度系数。机械品质因素大于9000,缺点是性能对成分变化较敏感。用于弹性敏感元件,如膜片、弹簧管等,以及频率元件如机械滤波器中的振子,频率谐振器中的音叉,谐振电器中的簧片等
Ni42Cr6Ti (Ni42, Cr6.5, Ti2.8, Co0.05, Fe 余量)	-50 ~ 60	8.7	8.1	1.0 ~ 1.2	80 ~ 90	切变模量温度系数较3J53低,对成分敏感性小。用于螺旋弹簧,延迟线等
Ni42CrMoTi(YC—12) ^① (Ni42, Cr3.5, Ti2, Mo2.5, Cu0.3, Co0.05, Fe 余量)	20 ~ 150	7.0			180 ~ 185	频率温度系数 $\leq 1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,对热处理敏感性比3J53小,机械品质因素大于1000。用于频率元件及弹性元件
Ni43CrTiAl(3J58) ^① (Ni43, Cr5.5, Ti2.5, Co0.05, Fe 余量)	-40 ~ 120	8.3		1.0	150 ~ 160	频率温度系数比3J53小,工作温度范围有所扩大。用途同3J53
Ni45CrTi (Ni45, Cr6, Ti2.5, Co0.05, Fe 余量)	-40 ~ 200	8.0		1.0		增加镍含量,工作温度范围进一步扩大。用途同3J53
Ni39Mo8Ti (Ni39, Mo8, Ti2, Fe 余量)	20 ~ 40			1.0		弹性后效小,用作0.2级电磁系电表张丝,其力矩温度系数小于0.05%/10℃,但与铜基合金相比则电阻大,较难焊接,有磁性
Ni39Mo5CrTi (Ni39, Mo5, Cr3, Ti2, Fe 余量)	20 ~ 40			1.1		利用适当的冷变形和热处理,可使张丝的力矩温度系数小于0.03%/10℃,弹性后效小于0.03%,弱磁性用于0.1级电磁系电表张丝

① 括号内为我国牌号。

表 10-54 金属间化合物强化型恒弹性合金的热处理和力学性能

合 金	热处理规范与合金状态	抗拉强度 σ_b/MPa	弹性模量 E/MPa	弹性模量 温度系数 β / $\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	伸长率 δ (%)	硬度 HV
Ni42CrTiAl(3J53) ^①	软化:950 ~ 980℃,水冷 软回火:650 ~ 700℃,2 ~ 4h 硬回火:600 ~ 650℃,2 ~ 4h	550 > 1100 > 1250	> 175 > 180	< 20 < 20	40 > 8 > 5	360 400
Ni42Cr6Ti	软化:950℃,水冷 硬回火:650℃,4h	1600	70(切变模量)	10	> 5	440
Ni42CrMoTi(YC—12) ^①	软化:980 ~ 1000℃,水冷 硬回火:500 ~ 600℃,4h	> 1400	200		> 3	> 400

(续)

合 金	热处理规范与合金状态	抗拉强度 σ_b /MPa	弹性模量 E /MPa	弹性模量 温度系数 β $/\times 10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	伸长率 δ (%)	硬度 HV
Ni43CrTiAl(3J58) ^①	软化:950~980℃,水冷 硬回火:550~650℃,4h	550 1400	185		5	≥ 360
Ni45CrTi	软化:910~950℃,水冷 软回火:700℃,4h 硬回火:600℃,4h	650 1200 1500	180~190		45 20 10	130 300
Ni39Mo8Ti ^②	软化:950~1000℃,水冷 硬回火:650~700℃,2h	850 1450~1560		20	2~4	120 >400
Ni39Mo5CrTi ^②	硬回火:600~630℃,2h	>1500	190~200	-50		>500

① 括号中为中国牌号。

② 丝材。

表 10-55 Ni42CrTiAl 合金经三种热处理后的力学性能

热处理方法	热 处 理 工 艺 规 范	$\sigma_{0.002}$ /MPa	δ (%)	HV
淬火+回火	920℃,40s,水淬	400	42	170
	上述处理后,再经 600℃,4h 回火	800	18	425
形变热处理	920℃,40s,水淬,再 20%冷变形	550	10	305
	上述处理后,再经 690℃,2h 回火	1100	8	430
二次淬火形 变热处理	920℃,40s,水淬;20%冷变形;再经 910℃,3s 快速淬火	970	22	360
	上述处理后,再经 600℃,2h 回火	1120	14	430

表 10-56 NiCrTiAl 合金二次快速淬火(910℃)时加热时间对力学性能的影响

预先冷变形 (%)	快速淬火加热时间 /s	$\sigma_{0.002}$ /MPa	$\sigma_{0.005}$ /MPa	δ (%)	HV
10	0	410	565	20	265
	3	689	760	28	255
	5	633	689	32	235
	10	589	670	33	230
	40	410	499	37	174
20	0	550	687	9	304
	3	975	1089	21	362
	5	700	836	30	321
	10	480	565	38	183
	40	400	498	39	170
50	0	664	792	5	325
	3	890	974	20	330
	5	659	776	28	274
	10	513	620	39	176
	40	410	535	40	172

表 10-57 Ni42CrTiAl 合金二次淬火形变热处理时工艺制度对弹性极限(带材轧向)的影响

预淬火温度 /℃	冷变形度 (%)	快速淬火温度 /℃	回 火		弹性极限 σ_e /MPa			HV
			温度/℃	时间/h	$\sigma_{0.002}$	$\sigma_{0.005}$	$\sigma_{0.01}$	
910	50	910	650	1	991	1150	1240	425
950				1	993	1120	1214	418
1000				1	907	1020	1093	412
910	50	910	700	1	990	1132	1328	427
950				1	960	1125	1240	414
1000				1	978	1110	1205	423
910	50	85	700	1	1075	1180	1260	427
		910		1	990	1132	1328	427
		950		1	960	1130	1220	435
910	50	910	700	1	1136	1220	1310	418
				1	990	1132	1323	427
				1	920	973	1024	300

表 10-58 两种铌基无磁性恒弹性合金的成分、热处理、力学性能和应用

合金(主要成分, 质量分数,%)	热处理制度和合金状态	抗拉强度 σ_b /MPa	弹性 模量 E /GPa	弹性模量 温度系数 β $/\times 10^{-6}\cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	伸长率 δ (%)	硬度 HV	工作温 度范围 /℃	主要特点和用途
NbTi39Al5 (Ti39.5, Al5.5, Nb 余量)	软化:1000℃,真空炉冷 软回火:700~725℃, 5~10h 硬回火:725℃,1h	600~680 >950 1050~ 1200	113	-70~-90 (20~500℃)	25~28 3 2	>300 330	20~500	无磁性,高温 及耐蚀性好。 弹性模量及其 温度系数较小, 弹性极限高。 在150℃的5% 硫酸、盐酸和磷 酸中,在200℃ 的35%硝酸和 有机酸中均有 良好的耐蚀性。 用于无磁恒弹 性张丝和特殊 用途弹簧
NbMo3Zr2.5Cr2Ti2 (Mo3.5, Zr2.5, Cr2, Ti2, Co0.03, Nb 余量)	软化:1600℃,真空炉冷 软回火:950℃,2~3h	900~ 1000	105~ 115	1~2 (20~ 700℃)	3~6	350	20~600	无磁性。高 温及耐蚀性好。 弹性模量及其 温度系数较小。 弹性极限高。 在150℃的5% 硫酸、盐酸和磷 酸中,在200℃ 的35%硝酸和 有机酸中均有 良好的耐蚀性。 用于无磁恒弹 性张丝和特殊 用途弹簧。工 作温度更高,抗 松弛性能良好。 在700℃,200h 时,应力下降 5%~6%

第 11 章 钢的表面热处理

11.1 感应加热热处理工艺规范及性能(表 11-1 ~ 表 11-69,图 11-1 ~ 图 11-14)

1. 基本技术参数(表 11-1 ~ 表 11-18,图 11-1)

表 11-1 几种典型服役条件下的零件表面硬化层深度要求

失效原因	工作条件	硬化层深度及硬度值要求
磨损	滑动磨损且负荷较小	以尺寸公差为限,一般 1 ~ 2mm,硬度 55 ~ 63HRC,可取上限
	负荷较大或承受冲击载荷	一般在 2.0 ~ 6.5mm 之间,硬度 55 ~ 63HRC,可取下限
疲劳	周期性弯曲或扭转负荷	一般为 2.0 ~ 12mm,中小型轴类可取半径的 10% ~ 20%,直径小于 40mm 取下限;过渡层为硬化层的 25% ~ 30%

注:齿轮硬化层深度(mm)一般取 0.2 ~ 0.4 m , m 为齿轮模数,参见 GB5671。

表 11-2 工件直径,合理的淬火层深度与电流频率的关系

电流频率 /Hz	合理的加热深度 /mm	淬火加热时的最小直径/mm		电流频率 /Hz	合理的加热深度 /mm	淬火加热时的最小直径/mm	
		可能的最小直径	希望的最小直径			可能的最小直径	希望的最小直径
50	15 ~ 80	100	200	8000	1 ~ 6	8	16
1000	3 ~ 17	22	44	10000	0.9 ~ 5.5	7	14
2500	2 ~ 11	14	28	70000	0.3 ~ 2.5	2.7	5.4
4000	1.5 ~ 9	11	22	400000	0.2 ~ 1	1.1	2.2

表 11-3 淬硬层深度与电流频率的关系

淬硬层深度/mm	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	10.0
最高频率/Hz	250000	100000	60000	30000	15000	8000	2500
最低频率/Hz	15000	7000	4000	1500	1000	500	150
最佳频率/Hz	60000	25000	15000	7000	4000	1500	500
推荐使用设备	真空管式	真空管式 或机式(8kHz)	真空管式 或机式(8kHz)	机式 (8kHz)	机式 (2.5kHz)	机式 (2.5kHz)	机式 (0.5,1.0kHz)

表 11-4 电流频率与热透入深度的关系

频 段	高 频				超音频	中 频			
频率/kHz	500 ~ 600	300 ~ 500	200 ~ 300	100 ~ 200	30 ~ 40	8	4	2.5	1
热透入深度/mm	0.7 ~ 0.56	0.9 ~ 0.7	1.1 ~ 0.9	1.6 ~ 1.1	2.9 ~ 2.5	5.6	7.9	10	15.8

表 11-5 根据淬硬层深度和工件直径选择频率的依据

淬硬层深度 /mm	工件直径 /mm	发 电 机 式			火花式	真空管式
		1000Hz	3000Hz	10000Hz	20 ~ 600kHz	≥ 200kHz
0.4 ~ 1.3	6 ~ 25				好	好
1.3 ~ 2.5	11 ~ 16			中	好	好
	16 ~ 25			好	好	好
	25 ~ 30		中	好	中	中
	> 50	中	好	好	差	差

(续)

淬硬层深度 /mm	工件直径 /mm	发 电 机 式			火花式	真空管式
		1000Hz	3000Hz	10000Hz	20 ~ 600kHz	≥ 200kHz
2.5 ~ 5.0	25 ~ 50		好	好	差	差
	50 ~ 100	好	好	中		
	> 100	好	中	差		

注:好—表示加热效率高。中—有两种情况:①比“好”的频率低,尚用来将所需淬硬深度加热到淬火温度,但效率低;②比“好”的频率高,比功率大时,易造成表面过热,加热效率亦低。差—表示频率过高,只有用很低的频率才能保证表面不过热。

表 11-6 常用感应加热设备的适用范围

频 率 /kHz	淬硬层深度/mm			齿轮模数 m (全齿同时加热淬火)
	最 小	适 中	可达到	
250 ~ 300	0.8	1 ~ 1.5	2.5 ~ 4.5	1.5 ~ 5(最好 2 ~ 3)
8	1.0	2 ~ 3	4 ~ 6	6 ~ 12(最好 8 ~ 9)
2.5	2.5	4 ~ 6	7 ~ 10	

表 11-7 不同模数齿轮全齿同时淬火时的最佳频率

齿轮模数 m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
电流频率/kHz	250	62.5	28	16	10	7	5	6	3	2.5

表 11-8 各种频率电流在 45 钢中的透入深度

电 频 率 /Hz	电 流 透 入 深 度/cm		电 频 率 /Hz	电 流 透 入 深 度/cm	
	冷 态(15℃)	热 态(800℃)		冷 态(15℃)	热 态(800℃)
50	0.5	7.0	10^4	0.034	0.5
500	0.15	2.2	10^5	0.011	0.16
2500	0.067	1.0	10^6	0.0034	0.05

表 11-9 不同材料推荐的感应加热淬火温度及通常希望的表面硬度^①

金 属	淬火温度 /℃	淬火 ^②	硬度 ^③ HRC	金 属	淬火温度 /℃	淬火 ^②	硬度 ^③ HRC
碳钢及合金钢 ^④				碳钢及合金钢 ^④			
$w_c0.30\%$	900 ~ 925	水	50		815 ~ 845	水 油	64 62
$w_c0.35\%$	900	水	52	铸铁 ^⑤			
$w_c0.40\%$	870 ~ 900	水	55	灰铸铁	870 ~ 925	水	45
$w_c0.45\%$	870 ~ 900	水	58	球光体可锻铸铁	870 ~ 925	水	48
$w_c0.50\%$	870	水	60	球铁	900 ~ 925	水	50
$w_c0.60\%$	845 ~ 870	水 油	64 62	不锈钢 ^⑥			
				420 型	1095 ~ 1150	油或空气	50

① 表中所列金属是成功应用于感应加热淬火的典型,表中所列不是包括所有的。
② 淬火的选择取决于所用钢的淬透性、加热区的直径或截面、层深及要求的硬度、要求最小的变形以及淬冷裂纹的倾向。
③ 最小表面硬度 HRC。
④ 相同碳含量的易切削钢和合金钢可以进行感应加热淬火。含有碳化物形成元素(Cr、Mo、V 或 W)的合金钢要加热到比表中所示温度高 55 ~ 110℃。
⑤ 钢中含碳量至少为 $w_c0.4\% \sim 0.5\%$,硬度随含碳含量改变。
⑥ 其他马氏体不锈钢如 410、416 及 440 可以进行感应加热淬火。

表 11-10 常用钢种表面淬火时推荐的加热温度(喷水冷却)

钢 号	原 始 组 织	预先热处理	下列情况下的加热温度/℃			
			A_{c1} 以上的加热速度/℃·s ⁻¹ A_{c1} 以上的加热持续时间/s			
			炉中加热	$\frac{30 \sim 60}{2 \sim 4}$	$\frac{100 \sim 200}{1.0 \sim 1.5}$	$\frac{400 \sim 500}{0.5 \sim 0.8}$
35	细片状珠光体 + 细粒状铁素体	正 火	840 ~ 860	880 ~ 920	910 ~ 950	970 ~ 1050
	片状珠光体 + 铁素体	退火或没有处理	840 ~ 860	910 ~ 950	930 ~ 970	980 ~ 1070
	索 氏 体	调 质	840 ~ 860	860 ~ 900	890 ~ 930	930 ~ 1020
40	细片状珠光体 + 细粒状铁素体	正 火	820 ~ 850	860 ~ 910	890 ~ 940	950 ~ 1020
	片状珠光体 + 铁素体	退火或没有处理	820 ~ 850	890 ~ 940	910 ~ 960	960 ~ 1040
	索 氏 体	调 质	820 ~ 850	840 ~ 890	870 ~ 920	920 ~ 1000
45, 50	细片状珠光体 + 细粒状铁素体	正 火	810 ~ 830	850 ~ 890	880 ~ 920	930 ~ 1000
	片状珠光体 + 铁素体	退火或没有处理	810 ~ 830	880 ~ 920	900 ~ 940	950 ~ 1020
	索 氏 体	调 质	810 ~ 830	830 ~ 870	860 ~ 900	920 ~ 980
45Mn ₂ 50Mn	细片状珠光体 + 细粒状铁素体	正 火	790 ~ 810	830 ~ 870	860 ~ 900	920 ~ 980
	片状珠光体 + 铁素体	退火或没有处理	790 ~ 810	860 ~ 900	880 ~ 920	930 ~ 1000
	索 氏 体	调 质	790 ~ 810	810 ~ 850	840 ~ 880	900 ~ 960
65Mn	细片状珠光体 + 细粒状铁素体	正 火	760 ~ 780	810 ~ 850	840 ~ 880	900 ~ 960
	片状珠光体 + 铁素体	退火或没有处理	770 ~ 790	840 ~ 880	860 ~ 900	920 ~ 980
	索 氏 体	调 质	770 ~ 790	790 ~ 830	820 ~ 860	860 ~ 920
35Cr	索 氏 体	调 质	850 ~ 870	880 ~ 920	900 ~ 940	950 ~ 1020
	珠光体 + 铁素体	退 火	850 ~ 870	940 ~ 980	960 ~ 1000	1000 ~ 1060
40Cr 45Cr 40CrNiMo	索 氏 体	调 质	830 ~ 850	860 ~ 900	880 ~ 920	940 ~ 1000
	珠光体 + 铁素体	退 火	830 ~ 850	920 ~ 960	940 ~ 980	980 ~ 1050
40CrNi	索 氏 体	调 质	810 ~ 830	840 ~ 880	860 ~ 900	920 ~ 980
	珠光体 + 铁素体	退 火	810 ~ 830	900 ~ 940	920 ~ 960	960 ~ 1020
T8A	粒状珠光体	退 火	760 ~ 780	820 ~ 860	840 ~ 880	900 ~ 960
T10A	片状珠光体或索氏体(+渗碳体)	正火或调质	760 ~ 780	780 ~ 820	800 ~ 860	820 ~ 900
CrWMn	粒状珠光体或粗片状珠光体	退 火	800 ~ 830	740 ~ 880	860 ~ 900	900 ~ 950
	细片状珠光体或索氏体	正火或调质	800 ~ 830	820 ~ 860	840 ~ 880	870 ~ 920

表 11-11 表面硬化需要的功率密度^①

频率 /kHz	淬火深度 ^③ /mm	输入/W·mm ⁻² ^②			频率 /kHz	淬火深度 ^③ /mm	输入/W·mm ⁻² ^②		
		低 ^④	最佳值 ^⑤	高 ^⑥			低 ^④	最佳值 ^⑤	高 ^⑥
500	0.38 ~ 1.14	10.9	15.5	18.6	3	2.29 ~ 3.05	15.5	23.3	26.35
	1.14 ~ 2.29	4.7	7.8	12.4		3.05 ~ 4.06	7.8	21.7	24.8
10	1.52 ~ 2.29	12.4	15.5	24.8	1	4.06 ~ 5.08	7.8	15.5	21.7
	2.29 ~ 3.05	7.8	15.5	23.3		5.08 ~ 7.11	7.8	15.5	18.6
	3.05 ~ 4.06	7.8	15.5	21.7		7.11 ~ 9.14	7.8	15.5	18.6

① 此表根据使用合适的频率及设备正常的总工作效率。表中数值可用于静止或渐进加热方法。不过对于某些应用,采用渐进法淬火时要用高的输入值。

② 表中 kW 读数是加热周期中的最大值。

③ 淬硬层较深时采用输入 kW 数值较低。

④ 发电机容量有限时,可采用低的 kW 数值输入。这些 kW 值可用于计算给定发电机条件下可淬硬的最大工件(一次加热)。

⑤ 指最佳冶金效果。

⑥ 充分利用发电机容量时的较高生产率。

表 11-12 轴类零件感应加热比表面功率的选择

频 率 /kHz	硬化层深度 /mm	比功率/kW·cm ⁻²		
		低 值	最 佳 值	高 值
500	0.4 ~ 1.1	1.1	1.6	1.9
	1.1 ~ 2.3	0.5	0.8	1.2
10	1.5 ~ 2.3	1.2	1.6	2.5
	2.3 ~ 3.0	0.8	1.6	2.3
	3.0 ~ 4.0	0.8	1.6	2.1
2.5	2.5 ~ 5.0	1.0	3.0	7.0
	4.0 ~ 7.0	0.8	3.0	6.0
	5.0 ~ 10.0	0.8	3.0	5.0
8	1.0 ~ 3.0	1.2	2.3	4.0
	2.0 ~ 4.0	0.8	2.0	3.5
	3.0 ~ 6.0	0.4	1.7	2.8
3	2.3 ~ 3.0	1.6	2.3	2.6
	3.0 ~ 4.0	0.8	1.6	2.1
	4.0 ~ 5.0	0.8	1.6	2.1
1	5.0 ~ 7.0	0.8	1.6	1.9
	7.0 ~ 9.0	0.8	1.6	1.9

表 11-13 齿轮全齿同时加热时的功率(频率为 200 ~ 300kHz)

模数 <i>m</i>	1 ~ 2	2.5 ~ 3.5	3.75 ~ 4	5 ~ 6
比功率/kW·cm ⁻²	2 ~ 4	1 ~ 2	0.5 ~ 1	0.3 ~ 0.6

表 11-14 根据淬硬层深度选择加热时间与功率

零件直径或厚度/mm	淬硬层深度/mm	加热时间/s	比功率/kW·cm ⁻²	淬硬层深度/mm	加热时间/s	比功率/kW·cm ⁻²	淬硬层深度/mm	加热时间/s	比功率/kW·cm ⁻²	淬硬层深度/mm	加热时间/s	比功率/kW·cm ⁻²	淬硬层深度/mm	加热时间/s	比功率/kW·cm ⁻²	淬硬层深度/mm	加热时间/s	比功率/kW·cm ⁻²
直径	<i>f</i> = 2.5kHz 圆柱外表面加热																	
20	2	0.8	2.65	3	1.5	1.5	4	2	1.18	5			6			7		
30	2	1	2.62	3	2	1.35	4	3.1	1.0	5	5.5	0.65	6			7		
40	2	1	2.6	3	2.3	1.28	4	4	0.88	5	7.1	0.58	6	10	0.45	7	13.3	0.38
50	2	1	2.6	3	2.7	1.24	4	4.8	0.81	5	8.5	0.54	6	13	0.41		17.8	0.34
60	2	1	2.6	3	3.0	1.21	4	5.2	0.79	5	9.5	0.51	6	15	0.39	7	20.5	0.31
70	2	1	2.6	3	3.2	1.2	4	5.6	0.78	5	10.1	0.5	6	16.1	0.38	7	22.8	0.3
80	2	1	2.6	3	3.1	1.2	4	5.7	0.76	5	10.8	0.49	6	17.2	0.37	7	25	0.29
90	2	1	2.6	3	3.1	1.2	4	6	0.75	5	11.3	0.49	6	18	0.30	7	26.2	0.28
100	2	1	2.6	3	3.1	1.2	4	6	0.75	5	11.7	0.49	6	18.7	0.35	7	27.8	0.28
110	2	1	2.6	3	3.1	1.2	4	6	0.75	5	11.9	0.49	6	19.2	0.35	7	28.5	0.28

(续)

零件直径或厚度/mm	淬硬层深度/mm	加热时间/s	比功率/ $\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}$	淬硬层深度/mm	加热时间/s	比功率/ $\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}$	淬硬层深度/mm	加热时间/s	比功率/ $\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}$	淬硬层深度/mm	加热时间/s	比功率/ $\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}$	淬硬层深度/mm	加热时间/s	比功率/ $\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}$	淬硬层深度/mm	加热时间/s	比功率/ $\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}$
厚度	$f = 2.5\text{kHz}$ 平面零件单面加热																	
10	2	0.7	3.7	3	3	1.8	4	5.9	1.0	5	8.8	0.8	6	11	0.66			
15	2	0.7	3.55	3	3.6	1.62	4	7.9	0.88	5	11.9	0.68	6	16.5	0.54			
20	2	0.7	3.52	3	4.0	1.54	4	8.7	0.78	5	14.2	0.6	6	22	0.46	7	29	0.4
25	2	0.7	3.52	3	4.0	1.54	4	8.7	0.78	5	16.5	0.52	6	27.5	0.4	7	38	0.38
30	2	0.7	3.52	3	4.0	1.54	4	8.7	0.78	5	17.5	0.52	6	29.8	0.4	7	41.5	0.35
35	2	0.7	3.52	3	4.0	1.54	4	8.7	0.78	5	18	0.52	6	30.7	0.4	7	42.7	0.35
40	2	0.7	3.52	3	4.0	1.54	4	8.7	0.78	5	18	0.52	6	31	0.4	7	43.5	0.35
45	2	0.7	3.52	3	4.0	1.54	4	8.7	0.78	5	18	0.52	6	31	0.4	7	44	0.35
50	2	0.7	3.52	3	4.0	1.54	4	8.7	0.78	5	18	0.52	6	31	0.4	7	44.2	0.35
直径	$f = 4\text{kHz}$ 圆柱外表面加热																	
20	2	1.0	2.20	3	1.88	1.25	4	2.5	0.98	5			6			7		
30	2	1.25	2.17	3	2.50	1.12	4	3.88	0.83	5	6.88	0.54	6			7		
40	2	1.25	2.17	3	2.88	1.06	4	5.00	0.73	5	8.88	0.48	6	12.5	0.37	7	16.63	0.32
50	2	1.25	2.17	3	3.38	1.03	4	6.00	0.67	5	10.63	0.45	6	16.25	0.33	7	22.25	0.28
60	2	1.25	2.17	3	3.75	1.00	4	6.50	0.66	5	11.88	0.42	6	18.75	0.32	7	25.63	0.26
70	2	1.25	2.17	3	4.00	1.00	4	7.00	0.65	5	12.63	0.41	6	20.13	0.32	7	28.5	0.25
80	2	1.25	2.17	3	3.88	1.00	4	7.13	0.63	5	13.50	0.40	6	21.5	0.31	7	31.25	0.24
90	2	1.25	2.17	3	3.88	1.00	4	7.50	0.62	5	14.13	0.40	6	27.0	0.30	7	32.75	0.23
100	2	1.25	2.17	3	3.88	1.00	4	7.50	0.62	5	14.63	0.40	6	23.38	0.30	7	34.75	0.23
110	2	1.25	2.17	3	3.88	1.00	4	7.50	0.62	5	14.88	0.40	6	24.01	0.30	7	35.63	0.23
厚度	$f = 4\text{kHz}$ 平面零件单面加热																	
10	2	0.88	3.10	3	3.75	1.49	4	7.38	0.83	5	11	0.66	6	13.75	0.55	7		
15	2	0.88	2.95	3	4.50	1.34	4	9.88	0.73	5	14.88	0.56	6	20.63	0.45	7		
20	2	0.88	2.92	3	5.00	1.28	4	10.88	0.65	5	17.75	0.50	6	27.50	0.38	7	36.25	0.33
25	2	0.88	2.92	3	5.00	1.28	4	10.88	0.65	5	20.63	0.43	6	34.38	0.33	7	47.5	0.32
30	2	0.88	2.92	3	5.00	1.28	4	10.88	0.65	5	21.88	0.43	6	37.25	0.33	7	51.88	0.29
35	2	0.88	2.92	3	5.00	1.28	4	10.88	0.65	5	22.50	0.43	6	38.88	0.33	7	53.38	0.29
40	2	0.88	2.92	3	5.00	1.28	4	10.88	0.65	5	22.50	0.43	6	38.75	0.33	7	54.38	0.28
45	2	0.88	2.92	3	5.00	1.28	4	10.88	0.65	5	22.50	0.43	6	38.75	0.33	7	55.0	0.29
50	2	0.88	2.92	3	5.00	1.28	4	10.88	0.65	5	22.50	0.43	6	38.75	0.33	7	55.25	0.29
直径	$f = 8\text{kHz}$ 圆柱外表面加热																	
20	2	1.2	1.7	3	3	0.83	4	4.5	0.58	5			6			7		
30	2	1.5	1.58	3	3.8	0.78	4	7.0	0.51	5	10	0.38	6	14	0.3	7	18	0.25
40	2	1.8	1.52	3	4.1	0.74	4	8.5	0.48	5	13.7	0.34	6	20	0.26	7	24.5	0.21
50	2	1.8	1.5	3	4.3	0.72	4	9.5	0.46	5	16	0.315	6	24	0.24	7	32	0.19
60	2	1.8	1.5	3	5	0.71	4	10	0.45	5	18	0.31	6	27	0.22	7	38	0.18

(续)

零件直径或厚度/mm	淬硬层深度/mm	加热时间/s	比功率/ $\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}$	淬硬层深度/mm	加热时间/s	比功率/ $\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}$	淬硬层深度/mm	加热时间/s	比功率/ $\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}$	淬硬层深度/mm	加热时间/s	比功率/ $\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}$	淬硬层深度/mm	加热时间/s	比功率/ $\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}$	淬硬层深度/mm	加热时间/s	比功率/ $\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}$
直径	$f = 8\text{kHz}$ 圆柱外表面加热																	
70	2	1.8	1.5	3	5.5	0.7	4	10.8	0.44	5	19.3	0.3	6	30	0.21	7	43	0.17
80	2	1.8	1.5	3	5.8	0.7	4	11.5	0.44	5	20.2	0.3	6	32	0.21	7	47	0.17
90	2	1.8	1.5	3	5.8	0.7	4	12	0.44	5	21	0.3	6	34	0.21	7	50	0.17
100	2	1.8	1.5	3	5.8	0.7	4	12.2	0.44	5	22	0.3	6	35.5	0.21	7	52.5	0.17
110	2	1.8	1.5	3	5.8	0.7	4	12.5	0.44	5	22.5	0.29	6	36.5	0.21	7	54.5	0.17
厚度	$f = 8\text{kHz}$ 平面零件单面加热																	
10	2	1.5	1.77	3	4	1.1	4	8.0	0.7	5	10	0.5	6	13		7	17	
15	2	2	1.73	3	5.5	1.0	4	11.5	0.59	5	17.5	0.45	6	24.5	0.38	7	30	0.3
20	2	2	1.72	3	6	0.97	4	13	0.58	5	22	0.41	6	30.5	0.32	7	41	0.26
25	2	2	1.72	3	6	0.97	4	13.5	0.56	5	24.5	0.4	6	35	0.3	7	52	0.22
30	2	2	1.72	3	6	0.97	4	13.5	0.56	5	25	0.4	6	38	0.29	7	62	0.21
35	2	2	1.72	3	6	0.97	4	13.5	0.56	5	25	0.4	6	40	0.29	7	64	0.21
40	2	2	1.72	3	6	0.97	4	13.5	0.56	5	25	0.4	6	42	0.29	7	70	0.21
45	2	2	1.72	3	6	0.97	4	13.5	0.56	5	25	0.4	6	42	0.29	7	71	0.21
50	2	2	1.72	3	6	0.97	4	13.5	0.56	5	25	0.4	6	42	0.29	7	71.5	0.21
直径	$f = 250\text{kHz}$ 圆柱外表面加热																	
10	2	2.5	0.5	3			4			5			6			7		
20	2	4.0	0.44	3	9.0	0.28	4	11.5	0.22	5			6			7		
30	2	7.0	0.43	3	12.5	0.27	4	19	0.205	5	23	0.165	6	29	0.145	7	34	0.125
40	2	8.0	0.425	3	16.5	0.265	4	23	0.195	5	31	0.16	6	39	0.135	7	45	0.115
50	2	9.0	0.422	3	18	0.26	4	28	0.19	5	39	0.155	6	48	0.13	7	56	0.11
60	2	9.3	0.42	3	20	0.255	4	31	0.188	5	43	0.15	6	56	0.125	7	68	0.108
70	2	9.5	0.42	3	20.5	0.255	4	34	0.187	5	49	0.148	6	62	0.12	7	78	0.105
80	2	9.7	0.42	3	21	0.255	4	37	0.187	5	52	0.148	6	69	0.12	7	86	0.103
90	2	9.8	0.42	3	22	0.255	4	38.5	0.187	5	56	0.148	6	73	0.12	7	92	0.102
100	2	10	0.42	3	23	0.255	4	40	0.187	5	59	0.148	6	79	0.118	7	99	0.101
厚度	$f = 250\text{kHz}$ 平面零件单面加热																	
10	2	11	0.42	3	19	0.29	4	26	0.24	5	30	0.205	6	37	0.18	7	40	0.165
15	2	14	0.413	3	26	0.273	4	38	0.22	5	49	0.185	6	58	0.16	7	65	0.14
20	2	17	0.41	3	30	0.26	4	49	0.21	5	62	0.172	6	78	0.15	7	90	0.13
25	2	17	0.41	3	35	0.255	4	56	0.209	5	73	0.165	6	91	0.142	7	112	0.22
30	2	17	0.41	3	37	0.25	4	60	0.20	5	83	0.162	6	107	0.14	7	130	0.12
35	2	17	0.41	3	37.5	0.25	4	64	0.197	5	90	0.162	6	118	0.14	7	148	0.118
40	2	17	0.41	3	38	0.25	4	65	0.195	5	96	0.162	6	127	0.14	7	160	0.118
45	2	17	0.41	3	38	0.25	4	65	0.195	5	98	0.162	6	132	0.14	7	169	0.118
50	2	17	0.41	3	38	0.25	4	65	0.195	5	100	0.162	6	139	0.14	7	178	0.118

表 11-15 钢的穿透加热所需功率密度近似值^①

频 率 /Hz ^②	输入 ^③ /W·mm ⁻²				
	150 ~ 425℃	425 ~ 760℃	760 ~ 980℃	980 ~ 1095℃	1095 ~ 1205℃
60	0.09	0.23	④	④	④
180	0.08	0.22	④	④	④
1000	0.06	0.19	0.78	1.55	2.17
3000	0.05	0.16	0.62	0.85	1.09
10000	0.03	0.12	0.47	0.70	0.85

① 为了淬火、回火或锻造操作。

② 此表根据使用合适频率及设备正常的总工作效率。

③ 一般,这些功率密度是对 12 ~ 50mm 截面尺寸而言。尺寸较小的截面可使用较高的输入,尺寸较大的工件可能需要较低的功率输入。

④ 不推荐使用。

表 11-16 各种感应回火应用的功率、频率选择

截面尺寸 /mm	最高回火温度 /℃	电源 50 或 60 /Hz	频率转换器 180Hz	固态变频或中频			真空管大于 200kHz
				1000Hz	3000Hz	10000Hz	
3.2 ~ 6.4	705	—	—	—	—	—	良好
6.4 ~ 12.7	705	—	—	—	—	良好	良好
12.7 ~ 25	425	—	较好	良好	良好	良好	较好
	705	—	差	较好	良好	良好	较好
25 ~ 50	425	较好	较好	良好	良好	较好	差
	705	—	较好	良好	良好	较好	差
50 ~ 152	425	良好	良好	良好	较好	—	—
	705	良好	良好	良好	较好	—	—
152 以上	705	良好	良好	良好	较好	—	—

表 11-17 回火需要的大约功率密度

频率 ^① /Hz	输入 ^② /W·mm ⁻²		频率 ^① /Hz	输入 ^② /W·mm ⁻²	
	150 ~ 425℃	425 ~ 705℃		150 ~ 425℃	425 ~ 705℃
60	0.09	0.23	3000	0.05	0.16
180	0.08	0.22	10000	0.03	0.12
1000	0.06	0.19			

① 此表是根据设备的合适频率及正常的总工作效率。

② 一般,此功率密度适用于 12 ~ 50mm 截面的工件。较小尺寸的工件采用较高的输入,较大尺寸的工件可以用较低的输入。

表 11-18 几种常用钢感应加热表面淬火件炉中回火规范

钢 号	要求硬度 HRC	淬火后硬度 HRC	回 火 规 范	
			温度/℃	时间/min
45	40 ~ 45	≥ 50	280 ~ 320	45 ~ 60
		≥ 55	300 ~ 320	45 ~ 60
		≥ 50	200 ~ 220	45 ~ 60
	45 ~ 50	≥ 55	200 ~ 250	45 ~ 60
	50 ~ 55	≥ 55	180 ~ 200	45 ~ 60
50	53 ~ 60	54 ~ 60	160 ~ 180	45 ~ 60
40Cr	45 ~ 50	≥ 50	240 ~ 260	45 ~ 60
		≥ 55	260 ~ 280	45 ~ 60

(续)

钢 号	要求硬度 HRC	淬火后硬度 HRC	回 火 规 范	
			温度/℃	时间/min
42SiMn	45 ~ 50		220 ~ 250	45 ~ 60
	50 ~ 55		180 ~ 220	45 ~ 60
15, 20Cr 20CrMnTi 20CrMnMoV (渗碳淬火后)	56 ~ 62	56 ~ 62	180 ~ 200	60 ~ 120

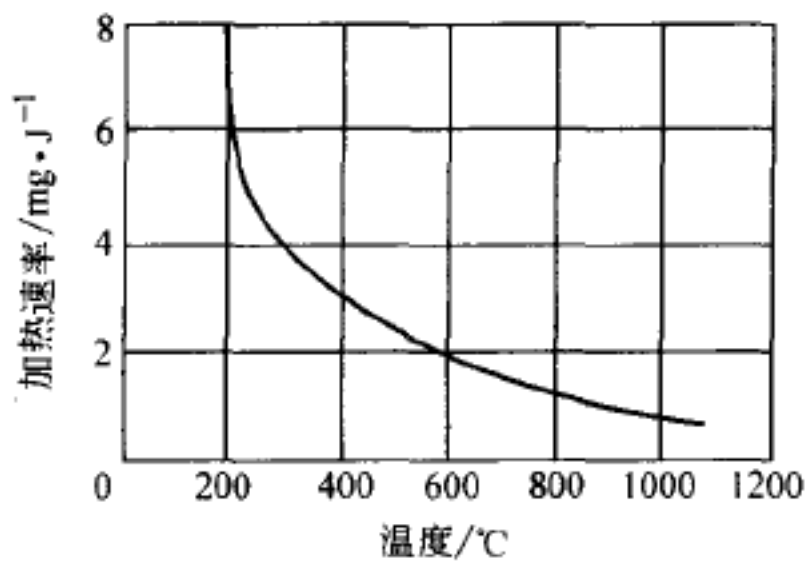


图 11-1 碳钢感应穿透加热时的热效率

2. 典型应用实例与冷却介质(表 11-19 ~ 表 11-29 和图 11-2 ~ 图 11-12)

表 11-19 超高频脉冲淬火应用实例

工件名称	工件名称	材 料	脉冲/ μ s	硬度 HV
锯齿类	纺织机针中	60	13	940
	木工卡锯	65Mn	82	950
	手 锯	T8	50	934
刀刃类	收割机刀片	80CrV ₂	100	65.5HRC
	电动剃须刀片	碳钢(w_c 1.4%)	6	980
	手术刀片	高碳不锈钢	60 间隔 600	
齿轮类	精密齿轮	AISI4130	25	55.5HRC
	打火机火石轮	渗碳钢	15	66.6HRC
其 他	微型电动机轴($\phi 8\mu$ m)、钩针、挂钩、打印机针等			

表 11-20 大功率脉冲淬火应用实例

零件类型	材 料	淬 火 工 艺				
		感应器	加热方法	加热时间	冷却方法	备 注
汽车凸轮	45	仿形	整体加热	0.5s	喷水	67 ~ 68HRC
小模数齿轮	40Cr	仿形	整体加热	0.7s	自冷	700HV
汽车转向齿条	40Cr	环形与齿顶平行	逐齿加热	140 μ s	自冷	700HV 淬硬层浅
汽车转向齿条	40Cr	圆铜钱仿齿形	埋水逐齿加热	206 μ s	埋水冷	840 ~ 927HV 齿顶未淬硬
汽车转向齿条	40Cr	矩形铜板仿齿形	埋水逐齿加热	206 μ s	埋水冷	900HV 淬硬层理想
汽车转向齿条	40Cr	矩形铜板仿齿形	逐齿加热	140 μ s	自冷	硬度稍低

注:脉冲淬火时齿沟不淬硬、解决了齿条弯曲变形问题。

表 11-21 $\phi 500\text{mm} \times 1700\text{mm}$ 冷轧辊双频连续加热淬火的工艺参数和效果

双频的 频率	主要工艺参数		表面加热层特征			距辊面 15 mm 处的奥	距辊面 15 mm 处的	有效淬	备 注
	比功率 $/\text{kW} \cdot \text{cm}^{-2}$	移动速度 $/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	温度曲 线形状	加热到 800℃ 以上的深度 $/\text{mm}$	加热到 880℃ 以上的深度 $/\text{mm}$	氏体化时间 $/\text{min}$	冷却速度 $/^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$	硬层深度 $/\text{mm}$	
50Hz 250Hz	0.3 (50Hz 为 0.2, 250Hz 为 0.1)	0.5 ~ 0.7	等温 降温式	50	20 ($> 870^{\circ}\text{C}$)	10	4.5	15 ~ 20	表面温度 900℃ 两感应器间 距 150mm

表 11-22 $\phi 500\text{mm} \times 1700\text{mm} 9\text{Cr}2\text{Mo}$ 冷轧辊工频双感应器加热淬火工艺参数

序 号	工 艺 参 数		预 热		淬火加热和冷却
			第一次	第二次	
1	感应器移动速度	$/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	1	1.5	0.6
2	电压空载/负载	$/\text{V}$	375/368		375/366
3	电 流 上感应器	$/\text{A}$	2100		2325
	下感应器	$/\text{A}$	1575		1538
4	比功率 上感应器	$/\text{kW} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.15	0.15	0.19
	下感应器	$/\text{kW} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.12	0.114	0.12
5	上下感应器距离	$/\text{mm}$	80	80	80
6	喷水开始时上感应器位置	$/\text{mm}$			150
7	平喷式喷水器进水压	$/\text{MPa}$			10
8	停电时上感应器位置	$/\text{mm}$			1910
9	延续冷却时间	$/\text{min}$			30

表 11-23 几种高频感应加热表面淬火工艺比较

工艺参数	超高频脉冲感应加热淬火	大功率脉冲感应加热淬火	普通高频感应加热淬火
振荡频率/kHz	27120	200 ~ 300	200
振荡功率/kW	—	> 100	—
功率密度/ $\text{kW} \cdot \text{cm}^{-2}$	10 ~ 30	5	0.2
加热速度/ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$	$10^4 \sim 10^6$	10^5	$10^2 \sim 10^4$
加热时间/s	0.001 ~ 0.1	0.2 ~ 0.6	0.1 ~ 5

表 11-24 42Si2MnMoVA 钢高频感应加热淬火、回火规范

钢 号	淬 火			回 火		
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷却介质	硬度 HRC	温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷却介质	硬度 HRC
42Si2MnMoVA	900	乳化液或水	—	150 ~ 180	空气	≥ 53

表 11-25 T10 钢(原始组织为粒状珠光体)27MHz 超高频脉冲加热表面淬火组织

加热时间 $/\mu\text{s}$	加热温度	加 热 转 变		淬 火 组 织	硬 度 HV
		铁 素 体	碳 化 物		
25	$\text{Ac}_1 < T < \text{Ac}_{\text{cm}}$	转变为奥氏体	全部未溶	极细马氏体 + 碳化物	940
50	$> \text{Ac}_{\text{cm}}$	同 上	部分溶解	板条马氏体 + 碳化物	940
250	接近熔点	同 上	全部溶解	片状马氏体 + 残留奥氏体	940

表 11-26 几种典型零件的冷却方法与冷却介质举例

零 件	材 料	加热方法	冷却方法	冷却介质(质量分数)	备 注
光轴、杆、销子等	45 40Cr	同时或连续 同时或连续	喷射 喷射	水 水	同时加热淬火时,应注意停喷温度,以防裂
花键轴	45 40Cr	同时或连续 同时 连续	喷射 喷射或浸淬 喷射	水或 0.05% 聚乙烯醇水溶液 油或 0.3% 聚乙烯醇水溶液或 10% 乳化液 水或 0.05% 聚乙烯醇水溶液	不预热,加热时两端不加热,键槽根部不淬火
凸轮轴	球铁 50Mn	同时 同时	喷射 喷射或浸淬	水 透平油或 20 号机械油	停喷温度 $\geq 25^{\circ}\text{C}$,感应圈与零件间隙 3 ~ 3.5mm,过小冷却不良,喷射压力 0.5MPa
曲 轴	45	同时或连续	喷射	水或 0.05% 聚乙烯醇水溶液	
	40Cr	同时	喷射	0.3% 聚乙烯醇水溶液或 10% 乳化液	
		连续	喷射	水或 0.05% 聚乙烯醇水溶液	
	50CrMoA	同时	喷油或埋油	油	
齿 轮 ($m = 1 \sim 3$) 齿 轮 ($m = 3 \sim 10$)	球铁	同时	喷射或浸淬	水或 0.05% ~ 0.3% 聚乙烯醇水溶液	
	45	同时	喷射	0.05% ~ 0.3% 聚乙烯醇水溶液	停喷温度 $\geq 200^{\circ}\text{C}$
	40Cr	同时	浸淬	油	
	45	同时	喷射	水或 0.05% 聚乙烯醇水溶液	
齿 轮 ($m = 3 \sim 10$)	40Cr	同时	喷射或浸淬	油或 0.3% 聚乙烯醇水溶液或 10% 乳化液或 10.05% 聚乙烯醇水溶液或水	用 0.05% 聚乙烯醇水溶液或水喷射冷却时,停喷温度 $\geq 260^{\circ}\text{C}$

表 11-27 几种常用冷却介质的冷却性能

冷却介质及其冷却方式	喷水圈与工件的间隙/mm	冷 却 条 件		冷却速度/ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$	
		压力/ $\times 101.25\text{kPa}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	600 $^{\circ}\text{C}$	250 $^{\circ}\text{C}$
喷 水	10	4	15	1450	1900
		3	15	1250	1750
		2	15	610	860
	40	4	20	1100	400
		4	30	890	330
		4	40	650	270
		4	60	500	200
	[L—AN15(10 号机械油)]	2	20	190	190
		3	20	210	210
		4	20	230	210
		6	20	260	320

(续)

冷却介质及其 冷却方式	喷水圈与工件的 间隙/mm	冷 却 条 件		冷却速度/℃·s ⁻¹	
		压力/×10 ¹ .25kPa	温度/℃	600℃	250℃
喷聚乙烯醇 水溶液(质量分数):0.025%		4	15	1250	1000
		4	15	730	550
		4	15	860	240
		4	15	900	320
浸 水			15	180	560
浸 油			50	65	10

表 11-28 工件感应加热淬火用的几种油的典型技术条件

一般用途淬火油(标准石蜡油)		快速淬火油	
40℃时赛氏粘度(SUS)/s	70~85	40℃时赛氏粘度(SUS)/s	75~110
闪点	165℃最低	闪点	175℃,最低
着火点	175℃,最低	着火点	200℃,最低
淬火温度	50~60℃	淬火温度	50~60℃
		可溶油水混合物	
		水-乳化油(质量分数)水中含10%~20%油	

表 11-29 感应加热热处理常见的质量问题及原因

缺陷种类	造 成 原 因
开裂	加热温度过高、温度不均;冷却过急且不均;淬火介质及温度选择不当;回火不及时且回火不足;材料淬透性偏高,成分偏析,有缺陷,含过量夹杂物;零件设计不合理,技术要求不当
淬硬层过深 或过浅	加热功率过大或过小;电源频率过低或过高;加热时间过长或过短;材料淬透性过低或过高;淬火介质温度、压力、成分不当
表面硬度过高 或过低	材料碳含量偏高或偏低,表面脱碳,加热温度低;回火温度或保温时间不当;淬火介质成分、压力、温度不当
表面硬度不均	感应器结构不合理;加热不均;冷却不均;材料组织不良(带状组织偏析,局部脱碳)
表面熔化	感应器结构不合理;零件有尖角、孔、槽等;加热时间过长;材料表面有裂纹缺陷

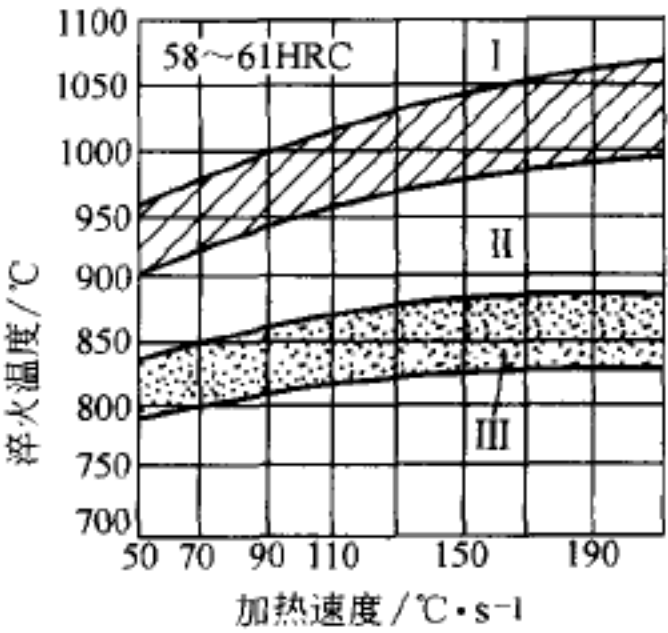


图 11-2 45 钢高频感应加热淬火最佳规范图
(材料为正火状态,薄片珠光体+铁素体)
I、Ⅲ—允许规范区 II—最佳规范区

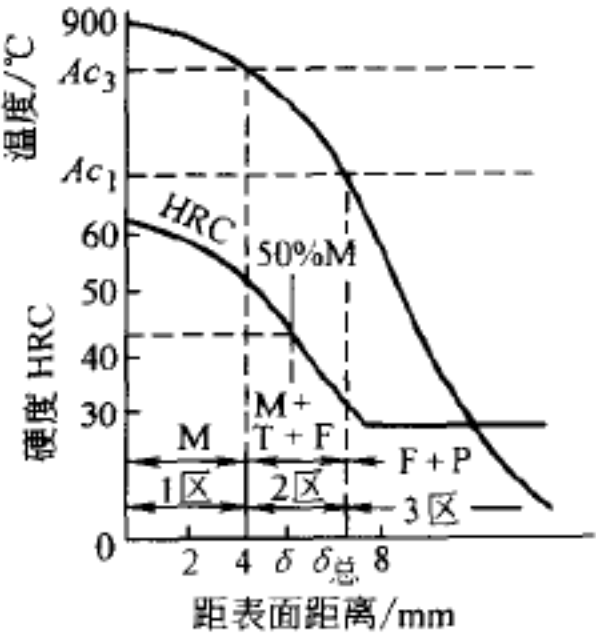


图 11-3 45 钢高频感应加热淬火温度-硬度-组织分布图

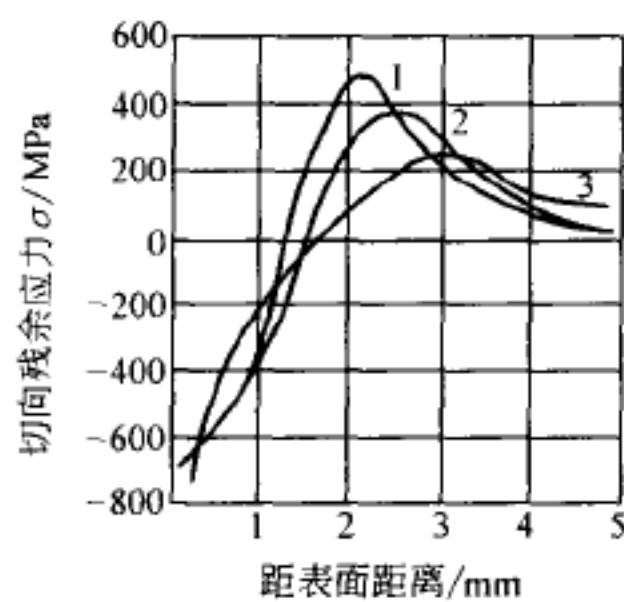


图 11-4 45 钢(φ65mm 试样)高频感应加热
淬火后的切向残余应力分布
1—硬化层深度为 1.5mm 2—硬化层深度为
2.0mm 3—硬化层深度为 3.0mm

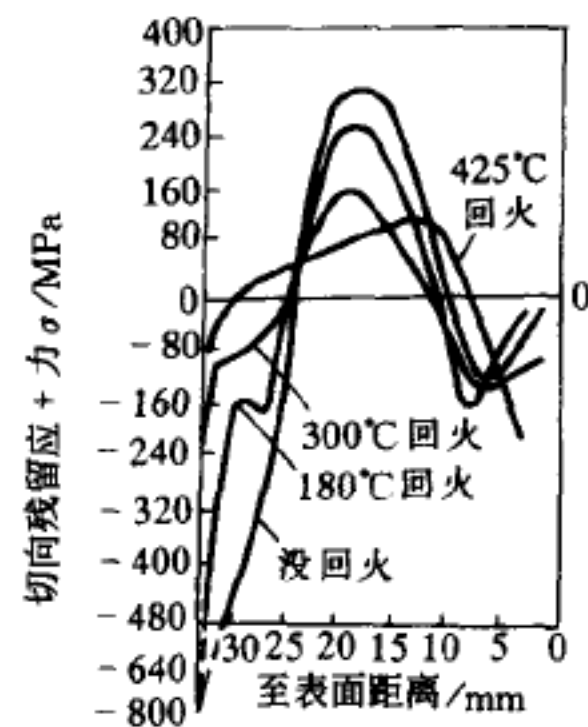


图 11-5 45 钢高频感应加热
淬火后回火对残余应力分布的影响
(试样尺寸: φ65mm; 硬化层深 6mm)

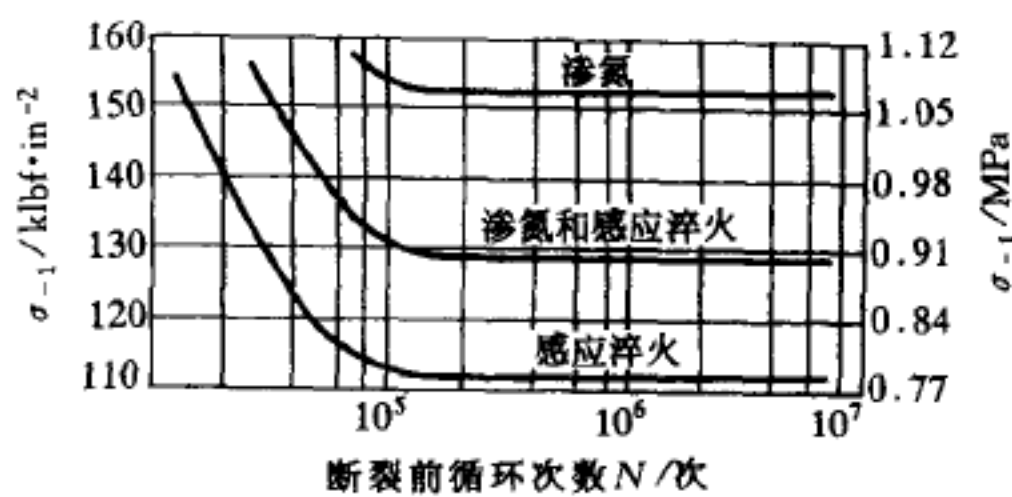


图 11-6 40CrNiMo 钢感应加热淬火、渗氮
+ 感应淬火和渗氮的疲劳极限比较

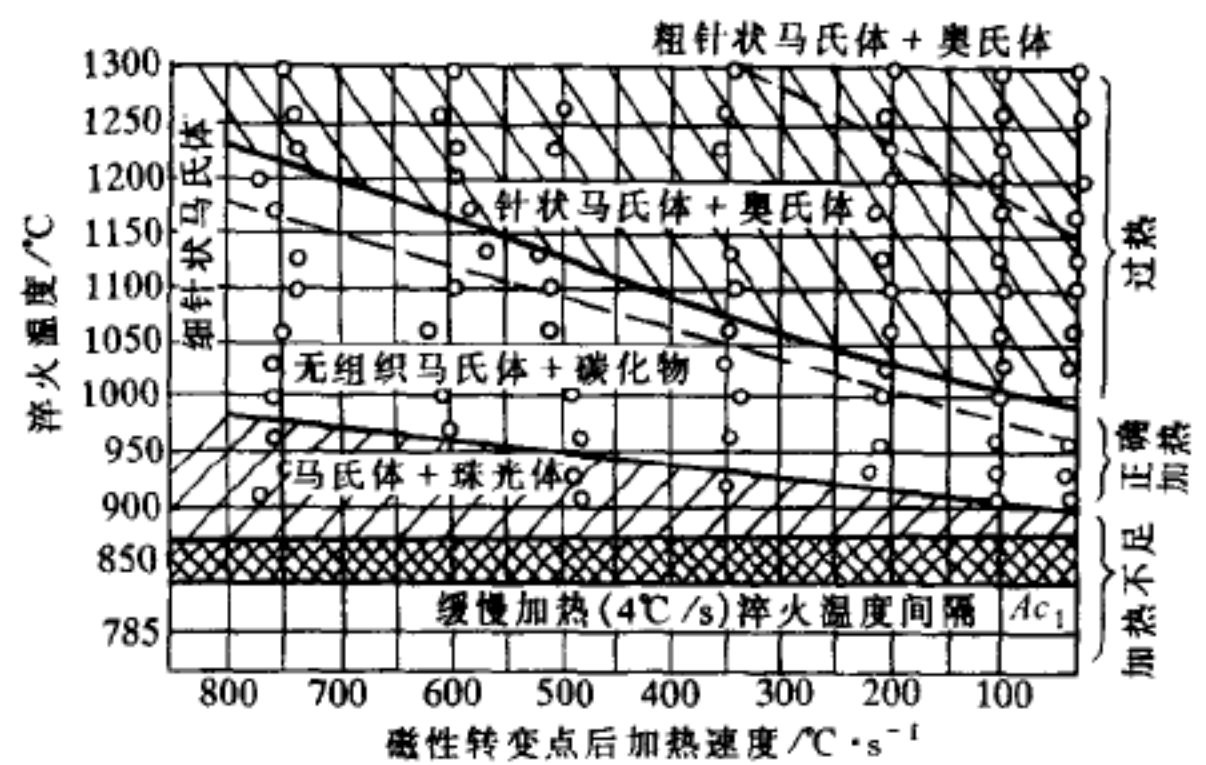


图 11-7 9CrSi 钢高频感应加热淬火组织图

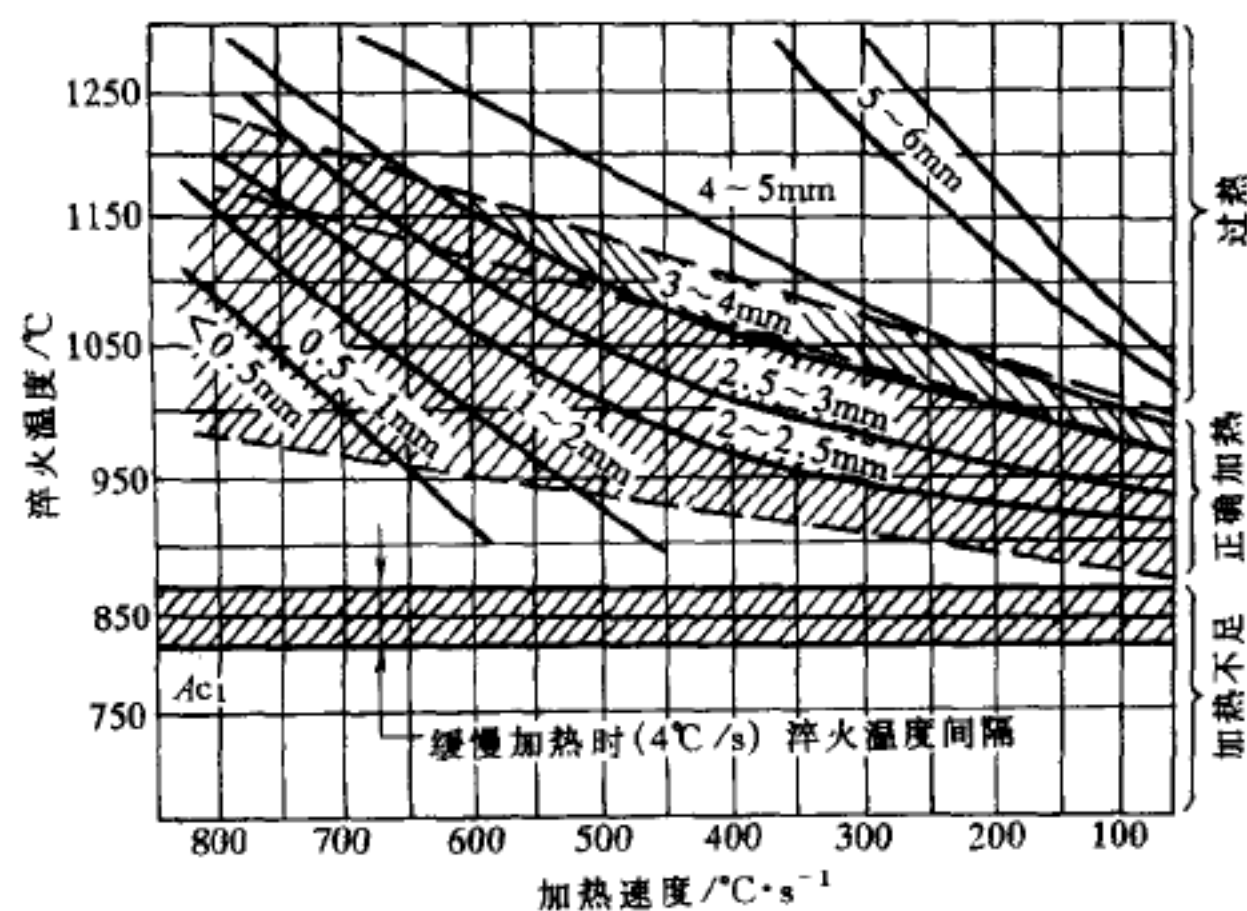


图 11-8 9CrSi 钢高频感应加热淬火规定淬火深度组织图(频率 300 ~ 350kHz)

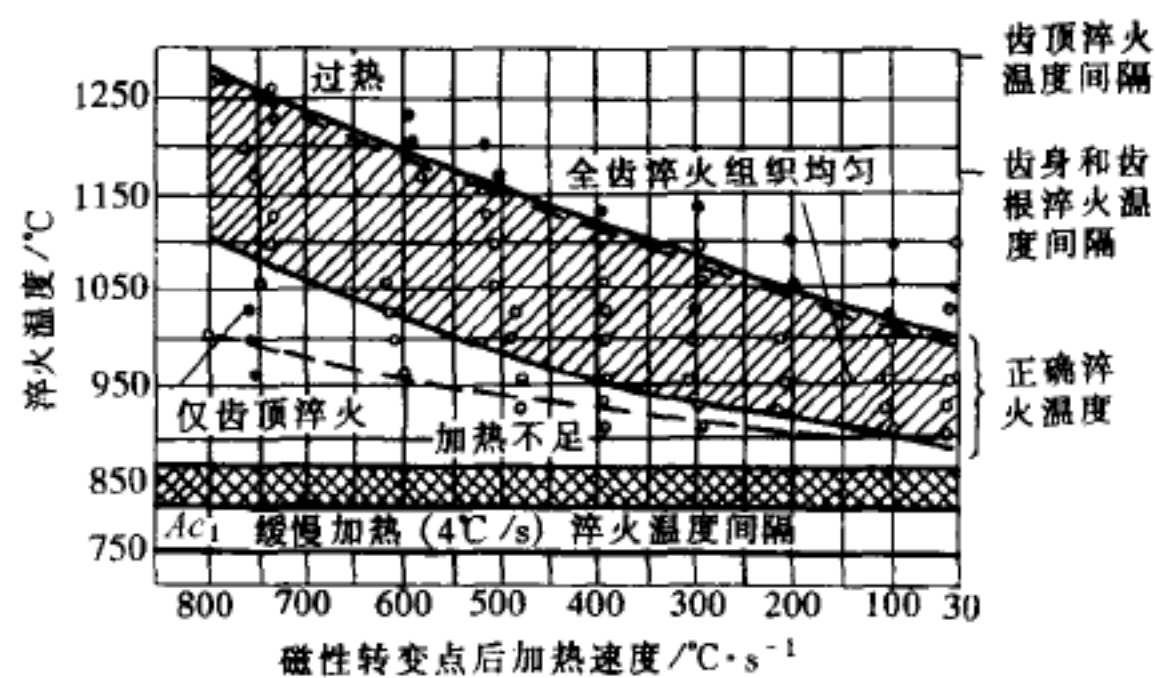


图 11-9 9CrSi 钢齿轮高频感应加热淬火组织图

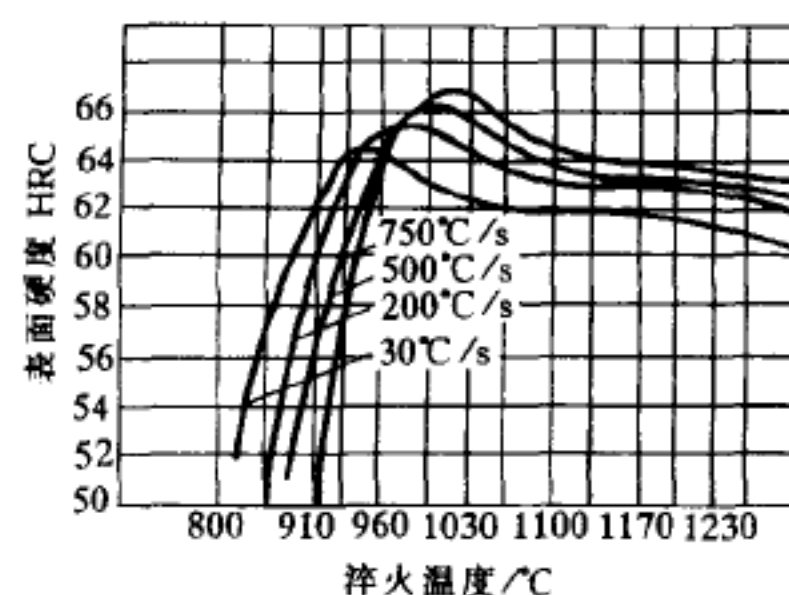


图 11-10 9CrSi 钢高频感应加热淬火温度对硬度的影响

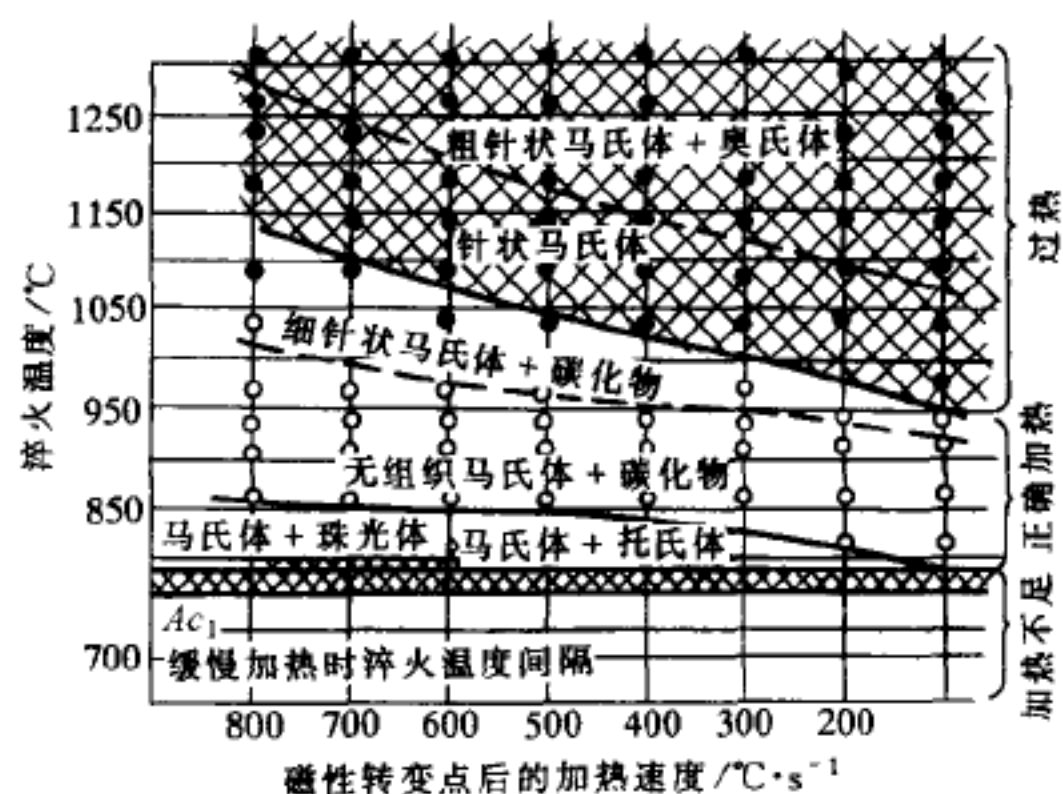


图 11-11 T10 钢高频感应加热淬火组织图

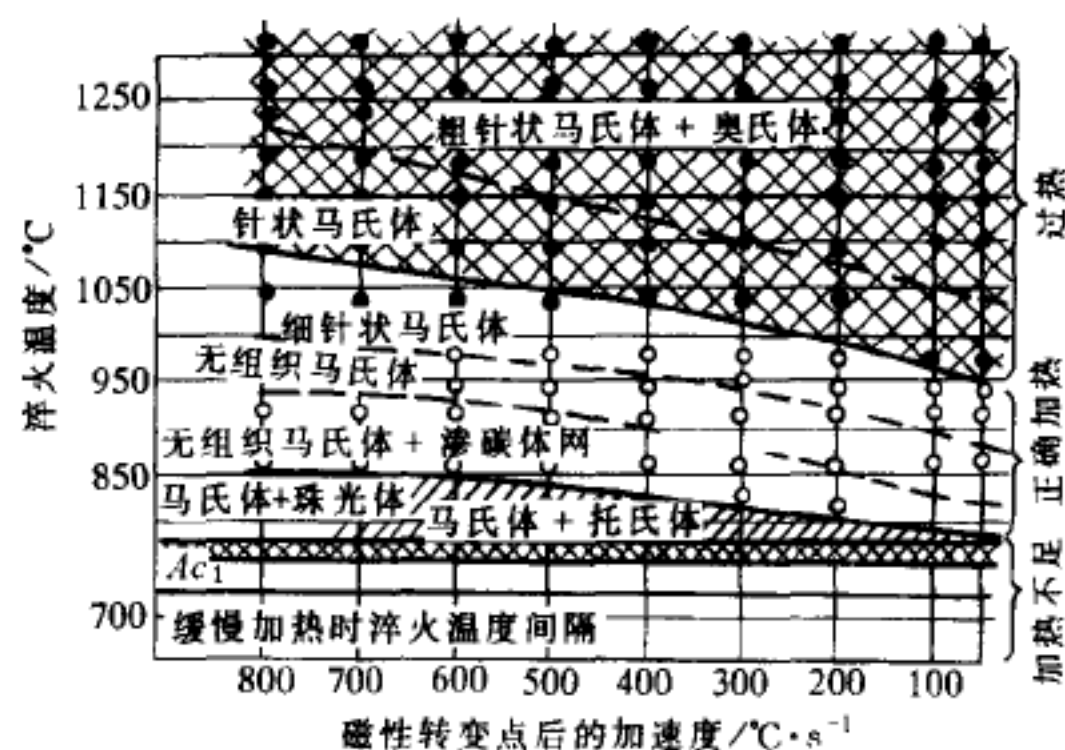


图 11-12 T12 钢高频感应加热淬火组织图

3. 感应器(表 11-30 ~ 表 11-37, 图 11-13、图 11-14)

表 11-30 同时加热淬火用的高频单匝感应器的高度 (单位:mm)

工件直径	感应器高度	备 注
≤ 25	$h \leq D/2$	1. 若工件淬火部位必须超过表内所列数据时,则选用多匝感应器 2. 多匝感应器高度与直径的比应为 $h/D = 3 \sim 5$, 超过此值, 温度不均, 中间温度偏高 3. 连续加热时, 一般取 $h = 10 \sim 15\text{mm}$, 如工件有淬硬的台阶、圆角时, 可取 $5 \sim 8\text{mm}$
25 ~ 50	14 ~ 20	
50 ~ 100	20 ~ 25	
100 ~ 200	25 ~ 30	
> 200	< 30	

表 11-31 不同条件用感应器高度

感应加热电源	轴类零件感应器高度/mm	齿轮类零件感应器高度/mm
高频	要求硬化区宽 + (3 ~ 6)	齿轮宽度 - (2 ~ 4)
中频	要求硬化区宽 + (8 ~ 12)	齿轮宽度 - (3 ~ 6)

表 11-32 制造感应圈时所用纯铜料的厚度 (单位:mm)

感应圈工作时的条件	不同频率时感应圈所用纯铜料厚度		
	200 ~ 300kHz	8000Hz	2500Hz
短时加热不通水冷却	1.5 ~ 2.5	8 ~ 12	12 ~ 16
加热时通水冷却	0.5 ~ 1.5	1.0 ~ 2.0	2.0 ~ 3.0

表 11-33 感应器和工件的间隙 (单位:mm)

工件或淬火部位	加热方法	高 频	中 频
简单圆柱外表面	同时	1.5~3(≥5)	2~5
简单圆柱外表面	连续	2~4	2~5
齿轮	全齿同时		
模数 1.0~2.5		2.0~2.5	
模数 3.0~3.5		2.5~3.5	
模数 4.0~4.5		3.0~4.5	
模数 5.0~6.0		4.0~5.5	
模数 7.0~8.0			4.5~5.5
内 孔	同时	0.5~2	
	连续	1~2	2~3
平面		0.5~1.5	1~3

表 11-34 自喷式感应器喷孔直径

冷却剂	高频/200~300kHz	中频/2.5 及 8kHz
水	0.8~1.2	1.0~1.8
聚乙烯醇水溶液	1.0~1.5	1.5~2.0
乳化液	1.0~1.2	1.5~2.0
油	1.2~1.5 (通常用附加喷头)	1.5~2.5 (通常用附加喷头)

表 11-35 连续加热自喷式感应器喷孔分布

频 率	喷孔间距/mm	喷孔轴线与工件轴线夹角	备 注
高频/200~300kHz	1.5~3.5	25°~45°	通常为一系列孔
中频/2.5~8kHz	2.0~4.0	25°~45°	一系列或四列孔

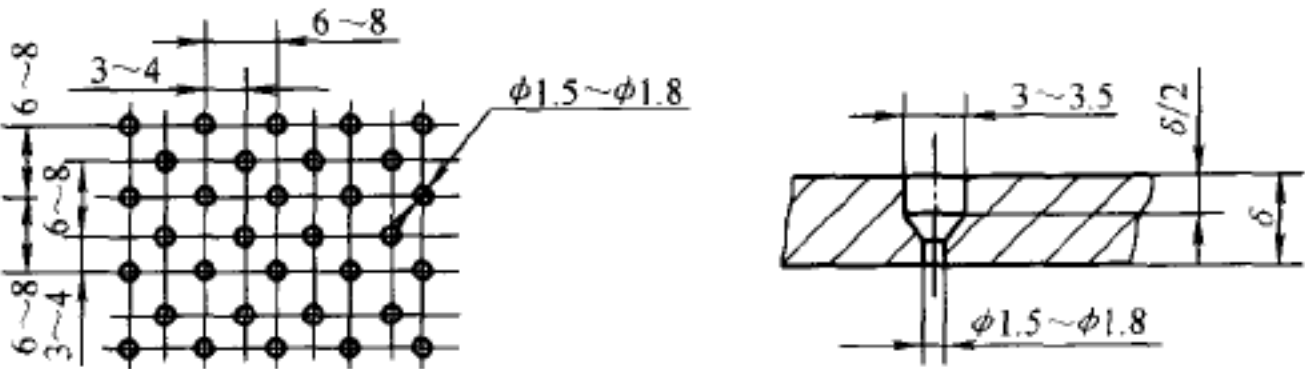


图 11-13 高中频感应器喷水孔的尺寸及排列方式

表 11-36 感应器的水斗和进水管数自选用表

零件直径/mm	淬火区长度/mm	水斗与进水管	示 意 图
15~45	15~30	在水套上直接焊两个进水管接头(无水斗)	
	30~60	两个水斗,两个进水管	

(续)


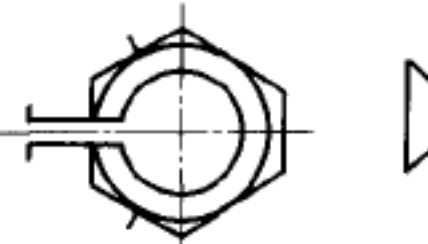
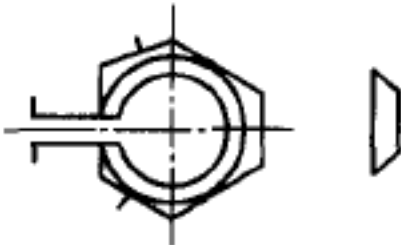



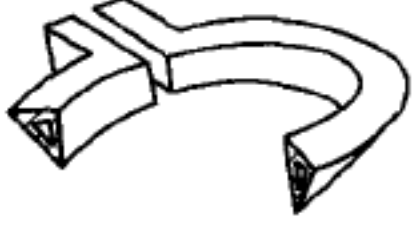


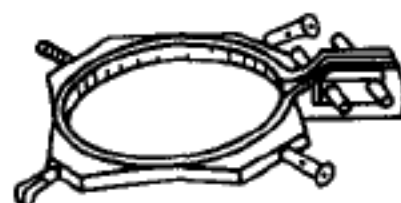
零件直径/mm	淬火区长度/mm	水斗与进水管	示意图
15 ~ 45	40 ~ 120	两个水斗,两个进水管	
45 ~ 80	25 ~ 50	三个水斗,三个进水管	
	50 ~ 120	三个水斗,六个进水管	
> 150	30 ~ 50	四个水斗,四个进水管	




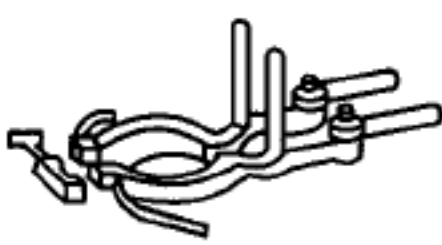
表 11-37 常用感应器的结构与实际应用举例

示例	结 构 图	用 途	设计参数	备 注										
例 1 高频外表 面同时加热 感应器		齿 轮、圆 盘等淬火加 热,亦可用 于节圆锥角 小于 20° 的 锥齿轮的淬 火加热	1. 感应圈内壁与零件间隙 a ,对于简单圆柱体 $a = 1 \sim 3\text{mm}$ (在特殊情况下 可增大至 5mm) 对于齿轮: 不同的模数 m 参照以下数 据选取: <table><tr><td>m/mm</td><td>a/mm</td></tr><tr><td>1.5 ~ 2</td><td>1.5 ~ 2</td></tr><tr><td>3 ~ 3.5</td><td>2.5 ~ 3</td></tr><tr><td>4 ~ 4.5</td><td>3 ~ 3.5</td></tr><tr><td>5 ~ 6</td><td>4 ~ 5</td></tr></table>	m/mm	a/mm	1.5 ~ 2	1.5 ~ 2	3 ~ 3.5	2.5 ~ 3	4 ~ 4.5	3 ~ 3.5	5 ~ 6	4 ~ 5	1. 零件的淬火冷却可在辅 加喷水圈中进行,或采用浸液 冷却 2. 在单件或小批量生产时, 可用这类感应器加热较高的 齿轮等零件,在加热过程中零 件反复上下移动,获得均匀加 热 3. 用于加热节圆锥角小于 20°的锥齿轮时,大端间隙一般 为 3mm 左右
m/mm	a/mm													
1.5 ~ 2	1.5 ~ 2													
3 ~ 3.5	2.5 ~ 3													
4 ~ 4.5	3 ~ 3.5													
5 ~ 6	4 ~ 5													

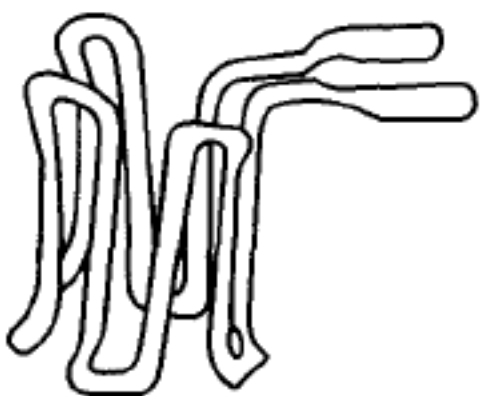


(续)

示例	结 构 图	用 途	设计参数	备 注										
例 1 高频外表 面同时加热 感应器		齿 轮、圆 盘等淬火加 热, 亦可用 于节圆锥角 小于 20° 的 锥齿轮的淬 火加热	2. 感应圈的高度 h_i 视零件 端面倒角情况而定 对于无倒角的零件, h_i 通过 比零件高度低 10% ~ 20%; 对 于有倒角的零件, h_i 可等于或 稍高于零件高度 感应圈的最大高度 h_{im} 与零 件直径 d 有关, 通常不超过以 下数值: <table><tr><td>d/mm</td><td>h_{im}/mm</td></tr><tr><td>14</td><td>14</td></tr><tr><td>50</td><td>20</td></tr><tr><td>100</td><td>25</td></tr><tr><td>100 ~ 400</td><td>25 ~ 30</td></tr></table>	d/mm	h_{im}/mm	14	14	50	20	100	25	100 ~ 400	25 ~ 30	4. 在加热多联齿轮的小轮 时, 为防止大轮端面被加热, 可把感应圈的截面设计成三 角形, 如附图所示 
d/mm	h_{im}/mm													
14	14													
50	20													
100	25													
100 ~ 400	25 ~ 30													
例 2 高频外表 面同时加热 感应器		齿 轮、圆 盘、短柱等 淬火加热, 亦可用于节 圆锥角小于 20° 的锥齿 轮的淬火加 热	3. 感应圈的宽度 b_i 对于用 纯铜管弯制的感应圈(第一例) b_i 的选择以保证冷却水流量 为准; 对于用纯铜板弯制的感 应圈 b_i 一般选用 1 ~ 2mm	1. 同上 1 2. 同上 2 3. 同上 3 4. 当零件加热所需感应圈 的高度大于 h_{im} 时应采用多匝 感应器										
例 3 高频外表 面同时加热 感应器		齿 轮、短 轴等淬火加 热	1. 为使零件轴向温度均匀, 三匝以上感应器、轴向中间部 位感应圈与零件的间隙可适当 增大, 使感应圈呈鼓形 2. 感应圈的总长度 L_i 与感 应圈高度 h_i 之比 $\frac{L_i}{h_i} > 5 \sim 10$ 时, 感应器效率较高, 可参照此 关系, 设计感应圈匝数 n 和 h_i h_i 一般不大于 10mm; n 一般 不大于 5	1. 零件的淬火冷却可在辅 加喷水圈中进行, 或采用浸液 冷却 2. 感应圈的匝间距可根据 加热温度的均匀情况加以调 整, 一般两端匝间距比中间小 3. 多匝感应器可用于多联 齿轮的多工位同时加热 双联齿轮两联直径相同时, 一般采用并联供电; 直径不同 时一般采用串联供电										
例 4 高频外表 面同时加热 感应器		飞 轮 齿 圈、齿 轮 等 淬火	1. 感应圈内壁与零件的间 隙 a 及高度 h_i 参照例 1、例 2 的设计参数选取 2. 感应圈的纯铜板厚度的 选择参照表 11-32 3. 喷水孔的大小与分布参 照表 11 ~ 34、表 11 ~ 35											

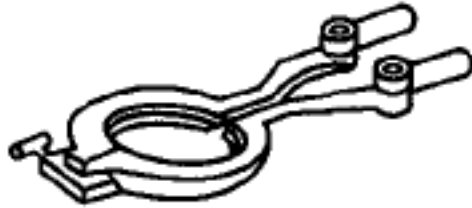
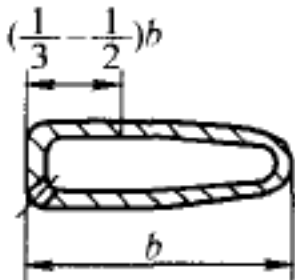


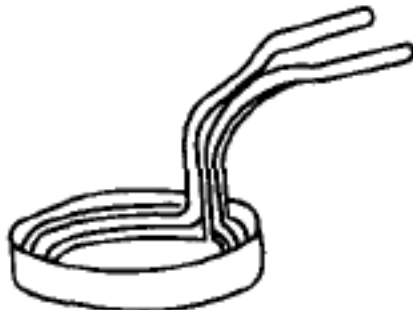
(续)

示例	结 构 图	用 途	设计参数	备 注												
例 5 高频外表 面同时加热 感应器		锥齿轮等 淬火加热	<p>1. 感应圈的锥角 θ_i 依齿轮节圆锥角 $\theta_{\text{节}}$ 大小设计:</p> <table><tr><td>$\theta_{\text{节}}$</td><td>θ_i</td></tr><tr><td>$30^\circ \sim 90^\circ$</td><td>$\theta_i = \theta_{\text{节}}$</td></tr><tr><td>$90^\circ \sim 130^\circ$</td><td>$\theta_i = \theta_{\text{根}}$</td></tr></table> <p>($\theta_{\text{根}}$ 为齿轮的根圆锥角)</p> <p>2. 感应圈内壁与零件的大端间隙 $a_{\text{大}}$ 依齿轮模数 m 的大小设计:</p> <table><tr><td>m/mm</td><td>$a_{\text{大}}/\text{mm}$</td></tr><tr><td>< 3</td><td>$1.5 \sim 2$</td></tr><tr><td>$3 \sim 5$</td><td>$2 \sim 3$</td></tr></table>	$\theta_{\text{节}}$	θ_i	$30^\circ \sim 90^\circ$	$\theta_i = \theta_{\text{节}}$	$90^\circ \sim 130^\circ$	$\theta_i = \theta_{\text{根}}$	m/mm	$a_{\text{大}}/\text{mm}$	< 3	$1.5 \sim 2$	$3 \sim 5$	$2 \sim 3$	<p>1. 零件的淬火冷却可在辅加喷水圈中进行,或采用浸液冷却</p> <p>2. 当齿高较低时感应圈也可用矩形截面铜管制造</p> <p>3. 锥齿轮亦可用单匝圆柱形感应器。此时,需将感应圈倾斜一定角度,对旋转着的斜齿轮进行加热,然后使齿轮落入喷水圈中冷却,或浸液冷却</p>
$\theta_{\text{节}}$	θ_i															
$30^\circ \sim 90^\circ$	$\theta_i = \theta_{\text{节}}$															
$90^\circ \sim 130^\circ$	$\theta_i = \theta_{\text{根}}$															
m/mm	$a_{\text{大}}/\text{mm}$															
< 3	$1.5 \sim 2$															
$3 \sim 5$	$2 \sim 3$															
例 6 高频外表 面同时加热 感应器		锥齿轮等 淬火加热	<p>1. 感应器锥角 θ_i 与大端间隙 $a_{\text{大}}$ 本表中的例 5</p> <p>2. 感应圈数 n 和高度 h_i 可参照本表中的例 3</p>	<p>1. 零件的淬火冷却可在辅加喷水圈中进行或采用浸液冷却</p> <p>2. 感应圈的匝间距可根据加热温度的均匀情况加以调整,一般两端匝间距比中间小</p>												
例 7 高频外表 面同时加热 感应器		锥齿轮等 淬火加热	感应圈波数可根据齿轮直径大小选取,一般为 3~5 个	<p>1. 可在感应圈外设置喷水圈喷冷,亦可将零件离开感应圈后在喷水圈中喷冷或浸液冷却</p> <p>2. 加热时零件必须旋转</p>												
例 8 高频外表 面同时淬火 感应器		凸轮轴等 淬火	<p>1. 感应圈与凸轮仿形,但各处间隙不同:凸轮尖部间隙为 4~10mm,其他部分间隙为 2~3mm</p> <p>2. 感应圈高度一般不超过 30mm</p>	<p>1. 凸轮尖端处可另加喷水头加强冷却</p> <p>2. 淬硬层深度可达 2mm 以上</p> <p>3. 感应圈亦可用铜板弯制,加热时不通水,而后在附加喷水圈中冷却淬火。这种感应器制造方便</p> <p>4. 当凸轮高度较大时,亦可采用连续加热自喷式感应器(一般感应器高度 $h_i = 5 \sim 8\text{mm}$),通常达到的淬硬层深度为 0.8~1.5mm</p> <p>5. 凸轮淬火一般采用中频同时加热质量较好</p>												

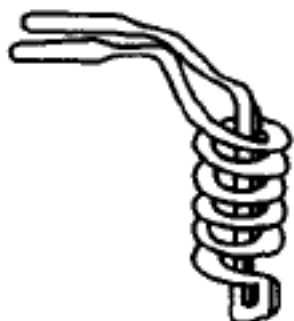

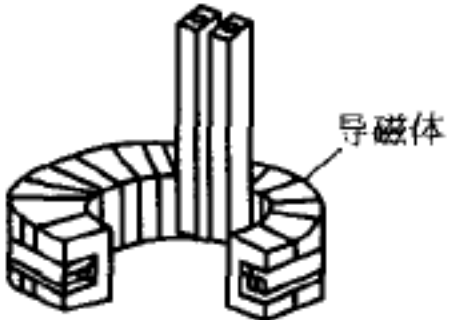
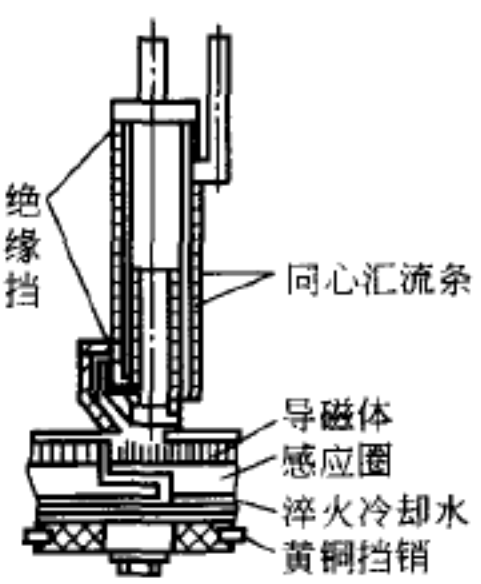

(续)

示例	结 构 图	用 途	设计参数	备 注
例 9 高频外表 面同时加热 感应器		蜗杆等淬 火加热	感应圈波数一般为 3~5 个; 为防止蜗杆端面过热,感应圈 波峰、波谷均应向外翘出;感应 圈与零件间隙 = 3~5mm	1. 可在感应圈外直接加喷 水圈冷却或离开感应圈后在 喷水圈中冷却 2. 加热时零件必须旋转 3. 蜗杆淬火加热感应器亦 可用方铜管制作成如下图所 示的感应圈,这种感应器两相 邻导线电流方向相同,加热效 果较好,但制造较前者困难, 而且不宜加热较大蜗杆
例 10 高频外表 面连续淬火 感应器		轴类(包 括花键轴) 等淬火	1. 感应圈内壁与零件的间 隙 a 可取 1.5~3.5mm 2. 感应圈的高度 h_i 一般为 10~15mm。如零件有台肩,过 渡处圆角需淬火时 h_i 可减少 至 5~10mm 3. 感应圈的宽度的选择要 保证足够的水流量,通常比同 时加热感应器大 4. 喷孔的尺寸、分布和喷水 角见表 11-34、表 11-35	1. 为增加加热深度及在 $\frac{L_i}{h_i}$ 小于 5 时,为提高感应器效 率,可把感应圈制成双圈 2. 双圈感应器的匝间距应 根据零件直径大小而定,一般 为 4~8mm 3. 在冷却不足时可辅加喷 水圈
例 11 高频外表 面连续淬火 感应器		钳口铁及 其他方截面 零件的淬火	1. 对钳口铁淬火,为减少淬 火变形,非淬硬面也应同时加 热,但感应圈与钳口铁各面的 间隙 a 、感应圈的喷水孔间距 $l_{孔}$ 和喷水角 α 应不同: 钳口面 $a = 1 \sim 2\text{mm}$ $l_{孔} = 2\text{mm}$ $\alpha = 45^\circ$ 其他侧面 $a = 4 \sim 8\text{mm}$ $l_{孔} = 3 \sim 3.5\text{mm}$ $\alpha = 55^\circ$ 2. 对一般方截面零件取 $a =$ 1~3mm	1. 方截面零件淬火感应器 必要时也可制成双匝和多匝 2. 可采用连环式感应器对 方锉等扁方形零件实行连续 淬火,这类感应器一般制成三 匝(结构如附图),常用 $\phi 4 \sim$ $\phi 5\text{mm}$ 纯铜管打方后弯成 3. 淬火时可采用自喷或在 辅加喷水圈中喷冷






(续)

示例	结构图	用途	设计参数	备注
例 12 高频外表 面连续淬火 感应器		曲轴零件 的淬火	<p>1. 感应圈内壁与零件间隙 a 可取 $1 \sim 3\text{mm}$</p> <p>2. 感应圈的高度 h_i 一般为 $5 \sim 8\text{mm}$</p> <p>3. 感应圈的宽度 b_i 要保证足够的流量,通常比一般连续淬火感应圈更宽一些;为防止曲轴扇板面被加热,铜管截面如例图所示</p> 	<p>1. 两汇流条同时进水自喷冷却</p> <p>2. 淬火时离合夹头必须夹紧</p>
例 13 高频平面 同时加热感 应器		圆端平 面,锥角很 大的锥齿轮 等淬火加热	<p>感应器螺旋圈数可根据零件加热面大小而定,一般为 $2 \sim 5$ 圈;螺旋线间距通常为 $3 \sim 6\text{mm}$</p>	<p>端面圆心附近加热温度较低,但当零件偏心放置旋转加热时,可消除圆心附近的低温区</p> <p>在感应圈上放置导磁体,可以提高感应器的电效率</p> <p>零件可用辅加喷水头冷却或浸液冷却</p>
例 14 高频平面 连续加热感 应器		加热面较 长的平面淬 火	<p>1. 两回线间距通常不小于感应圈与零件间隙的四倍;为避免尖角过热,感应圈的有效长度应小于被加热平面的宽度(每边 $3 \sim 4\text{mm}$)</p> <p>2. 感应圈铜管截面的高度 h_i 应尽量减小(一般为 $3 \sim 6\text{mm}$),宽度 b_i 应适当增大(一般为 $6 \sim 12\text{mm}$)</p> <p>3. 喷水孔的尺寸和分布参照表 11-34 和表 11-35 设计</p>	<p>1. 在感应圈上放置导磁体可以提高感应器的电效率</p> <p>2. 尺寸较大的感应器需附加加强装置</p> <p>3. 为提高感应器功率和效率,感应圈可设计成多回线式,使中间两相邻的导线电流流向相同</p>
例 15 高频内孔 同时加热感 应器		孔的深度 较浅的内孔 及内齿加热	<p>感应器外壁与零件的间隙 $a = 1 \sim 3\text{mm}$(对简单圆柱体内表面应尽可能采用较小的间隙)</p>	<p>1. 零件可在辅加喷水圈中喷冷或浸液冷却</p> <p>2. 当孔深小于 15mm 时,可用铜管直接弯制感应圈</p> <p>3. 直径较小的感应器通常应加装导磁体</p>

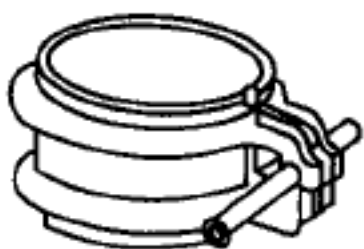
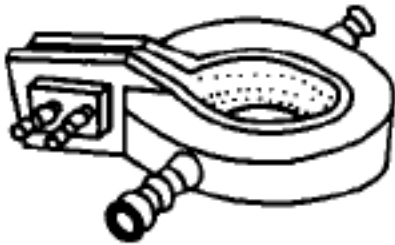
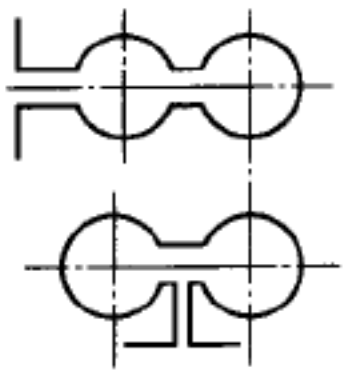

(续)

示例	结 构 图	用 途	设计参数	备 注
例 16 高频内孔 同时加热感 应器		较深内孔 的淬火加热	感应圈一般用 2~5 匝,匝间 距可取 2~4mm 感应圈外壁与零件间隙 $a =$ 1~2mm	1. 零件在辅加喷水圈中冷 却或浸液冷却 2. 这种多匝感应器一般用 于较小直径内孔的加热(直径 $\phi 20 \sim \phi 40\text{mm}$) 3. 当加热很小的内孔时可 采用回线式感应器(见下图), 加热时零件必须旋转 
例 17 高频内孔 连续淬火感 应器		大深度内 孔、内齿、内 花键等淬火	1. 感应圈外壁与零件的间 隙 $a = 1 \sim 2\text{mm}$ 2. 感应圈的高度 $h_i = 6 \sim$ 12mm 3. 感应圈的宽度 $b_i = 4 \sim$ 8mm 4. 喷水孔径大小与排列参 见表 11-34、表 11-35 设计	1. 这种感应器一般用于加 热直径大于 $\phi 50\text{mm}$ 的内孔 2. 当内孔深度很大时,为减 少汇流条感抗,可采用同心汇 流条(参见附图) 3. 为增加加热深度,提高感 应器电效率,这种感应器可制 成双圈的 
例 18 高频特殊 感应器		模数 m 大于 15 的 大模数齿轮 淬火加热	感应圈内壁和齿面间隙:节 圆部位间隙 1.5~2.5mm 节圆以上部位间隙:2.5~ 4mm 齿端面间隙:大于 10mm	1. 为避免邻齿被加热,用料 管径应合理选择,不易过大, 否则邻齿需带铜帽屏蔽 2. 辅加喷水头冷却 3. 齿根不能得到淬硬


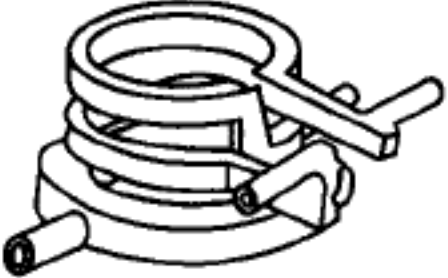
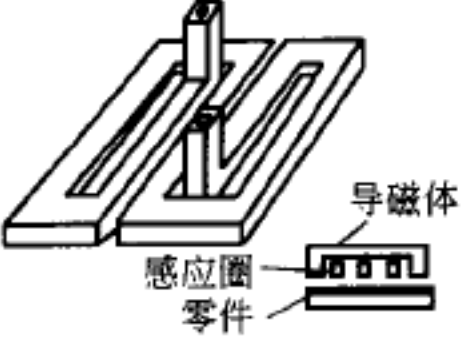
(续)

示例	结构图	用途	设计参数	备注
例 19 高频特殊 感应器		大模数锥 齿轮淬火加 热	感应圈铜板与齿形仿形, 铜 板长度每边比齿宽短 2~3mm 节圆处间隙为 1~2mm	1. 零件可用辅加喷头冷却 2. 齿根不能得到淬硬
例 20 高频特殊 感应器		模数 m 为 5~14 的 齿轮淬火	1. 感应圈内壁与齿面间隙: 节圆以上部位为 3~5mm; 靠 近齿根部位为 1~2mm 2. 感应圈与齿底间隙为 1~ 2mm 3. 感应圈与齿顶面间隙为 8 ~25mm	齿根不能得到淬硬
例 21 高频特殊 感应器		模数 m 为 6~14 的 齿轮的淬火	1. 感应圈与齿沟轮廓仿形, 与齿面的间隙一般为 1mm, 与 齿根间隙可小于 1mm 2. 感应圈高度 $h_i = 6 \sim 8\text{mm}$ 3. 导磁体高度为 10~12mm	加热时冷却水管喷冷导磁 体, 汇流条方管出水口喷冷齿 间及相邻两齿侧, 在加热淬火 过程中感应圈与零件间始终 为流水所充满 采用这种感应器亦可将零 件埋入水中进行水下加热, 此 时仍需喷水
例 22 高频特殊 感应器		模数 m 为 5~12 的 齿轮淬火	1. 三角形的角度根据齿形 设计 2. 感应圈与齿面的间隙为 2 ~3mm; 与齿根的间隙为 0.5~ 1mm 3. 两三角形间的竖直导线 截面形状为圆形或半圆形, 长 度为 8~20mm (包括三角形部 分高度)	1. 淬火冷却除自喷外, 还可 采用喷冷相邻二侧面或同时 采用这两种冷却方法 2. 这种感应器亦可制成单 三角形式的 (如下图)  3. 双三角形感应器常用于 大模数齿轮埋油淬火

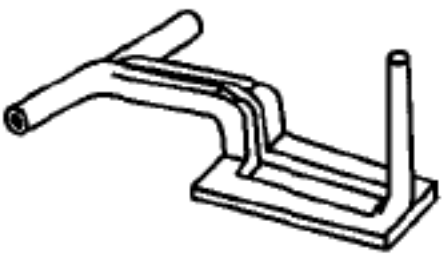

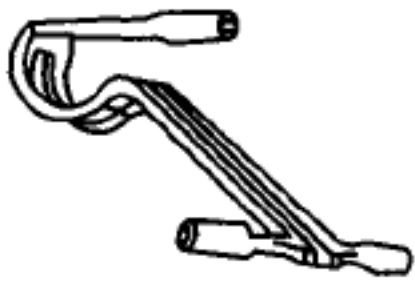
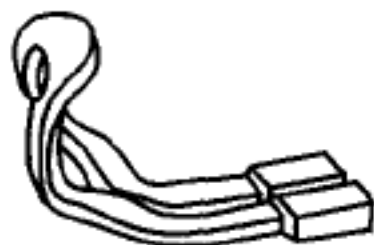

(续)

示例	结 构 图	用 途	设计参数	备 注
例 23 中频外表 面同时加热 感应器		齿轮、圆盘等淬火加热, 亦可用于节圆锥角小于 20° 的锥齿轮的淬火加热	1. 感应圈内壁与零件间隙 a 一般为 $2 \sim 5\text{mm}$ 2. 感应圈的高度 h_i 等于或稍大于零件高度; 一般小于 150mm 3. 感应圈宽度 b_i 一般为 $3 \sim 4\text{mm}$ 4. 感应圈靠焊在外侧的半圆管通水自冷, 当感应圈高度超过 70mm 时, 应焊接两条自冷半圆管 5. 两冷却水管分别与两对并联的汇流条联接, 这种供电能增加感应器两端的电流密度	1. 工件的淬火冷却可在辅加喷水圈中进行, 或采用浸液冷却 2. h_i 为 65mm 以下的感应器一般用单条冷却水管, 当工件带有台肩, 并过渡圆角要求淬火时, 应使冷却水管焊接在靠近台肩一侧 3. 用于加热节圆锥角小于 20° 的锥齿轮时大端间隙一般为 $4 \sim 5\text{mm}$ 左右 4. 当零件高度小于 25mm 时, 这类感应器可直接用方截面纯铜管弯制; 在单件或小批量生产时, 可用它加热较高的齿轮等零件, 在加热过程中反复使感应器和零件相对上下移动, 获得均匀加热
例 24 中频外表 面同时加热 感应器		齿轮、圆盘、短柱、凸轮轴等淬火	1. 感应圈内壁与零件的间隙 a : 加热圆柱体(及齿轮)时; $a = 2 \sim 5\text{mm}$; 加热凸轮(凸尖处); $a = 2.5 \sim 4\text{mm}$ 2. 感应圈高度 h_i : 加热圆柱体(及齿轮)时; h_i 等于或稍大于零件的高度; 加热凸轮时, h_i 比凸轮高度大 $3 \sim 6\text{mm}$ 3. 为加强零件两端的加热, 感应圈内孔两端可设计有 $2 \sim 4\text{mm}$ 见方的台肩; 台肩处与零件的间隙为 $2 \sim 4\text{mm}$ 4. 感应圈铜板厚度见表 11-32 5. 喷水孔的直径和分布参见表 11-34、表 11-35	1. 尺寸较高的外表面同时加热自喷式感应器进水管及水斗分布参见表 11-36 2. 为提高设备利用率和生产效率, 凸轮淬火感应器可制成双连式(如下图所示), 使两根凸轮能一次得到淬火  3. 带凸肩的感应器的凸肩结构如下图 

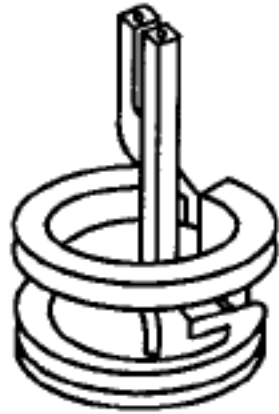
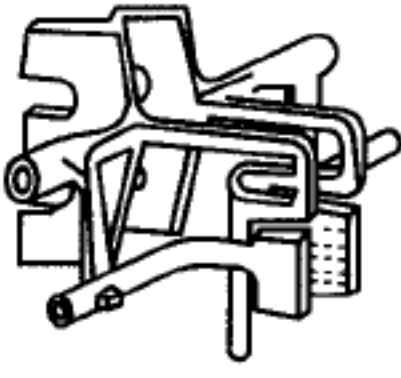
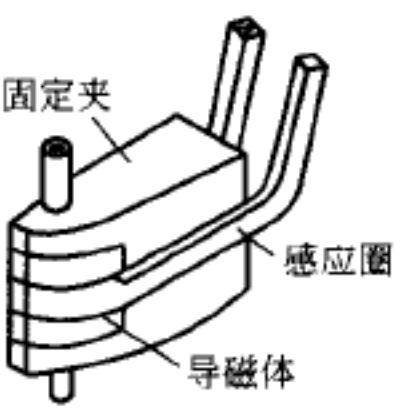
(续)

示例	结 构 图	用 途	设计参数	备 注
例 25 中频外表 面同时淬火 感应器		曲轴等淬 火	1. 感应圈内孔两端设计有台肩,台肩宽度为 $2 \sim 3\text{mm}$,台肩高度为 $2 \sim 6\text{mm}$ 2. 感应圈内孔两端台肩与零件间隙 $a = 2 \sim 3.5\text{mm}$ 3. 感应圈高度 $h_i = \text{曲轴颈长} - 2 \text{倍曲轴圆角半径}$ 4. 感应圈铜板厚度见表 11-32	1. 零件淬火自喷冷却由两进水管同时进水,连接板和铰链都不通水 2. 可参见例 12 设计连续淬火可分离式感应器,对曲轴颈进行连续淬火,但制作感应器的铜管管径和壁厚应按中频要求选择
例 26 中频外表 面连续淬火 感应器		轴、花键 轴、齿轮(齿 宽大)的淬 火	1. 感应圈内壁与零件的间隙 a 一般为 $2.5 \sim 5\text{mm}$ 2. 制作感应圈用方纯铜管的高度 $h_i = 14 \sim 20\text{mm}$,宽度 $b_i = 9 \sim 15\text{mm}$ 3. 匝间距一般为 $8 \sim 12\text{mm}$	1. 这类感应器除附带喷水圈外,可在下面一匝钻喷水孔,进行自喷冷却 2. 连续加热感应器亦可制成单匝自喷式的,其淬火深度比双匝的要浅,单匝感应器的设计参数可参照以下数据选取: $a = 2.5 \sim 3.5\text{mm}$ $h_i = 14 \sim 30\text{mm}$ $b_i = 9 \sim 20\text{mm}$ 3. 选用喷油或喷聚乙烯醇水溶液时,必须用附带喷水圈冷却
例 27 中频平面 同时淬火感 应器		淬火面较 小的平面淬 火	1. 矩形感应圈有效部分(中间三根导线),应略大于被加热平面,每边大 $3 \sim 6\text{mm}$ 2. 感应圈的高度为 $6 \sim 12\text{mm}$ 3. 中间三根导线间距为 $2 \sim 4\text{mm}$ 4. 最外侧两根导线与相邻导线间距均应大于 15mm	1. 这种感应器最主要的特征是中间三根导线电流方向相同,便于安置导磁体,具有较高的电效率 2. 可将几个同样尺寸的感应器串联起来,同时使用,提高设备利用率;串联数目合适时,可省掉淬火变压器,直接与设备匹配

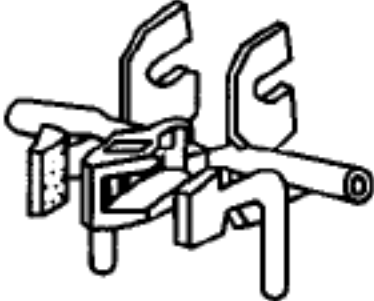

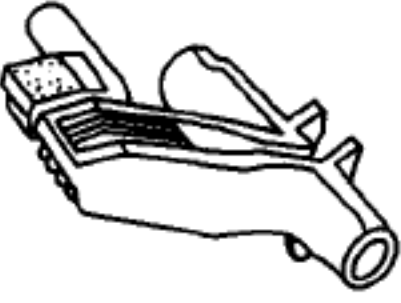
(续)

示例	结 构 图	用 途	设计参数	备 注
例 28 中频平面 连续淬火感 应器		淬火面较 长的平面淬 火	<p>1. 矩形感应圈的长 B_i 应比被加热平面宽度 B 要大, 通常 $B_i - B = 2 \times \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2} \right) b_i$</p> <p>其中 b_i 为感应圈截面的宽度, 一般为 $8 \sim 18\text{mm}$, 即加热时感应圈每边向外伸出 $\left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2} \right) b_i$, 如受零件形状限制不能向前伸出时, 可将感应圈前端铜管宽度减少 $\frac{1}{2}$</p> <p>2. 感应圈的高度 h_i 通常视宽度 b_i 的大小在 $4 \sim 10\text{mm}$ 间选取, 不宜过大</p> <p>3. 感应圈两回线的间距不能太小, 一般为 $12 \sim 20\text{mm}$</p>	<p>1. 感应圈由两进水管同时进水, 自喷冷却, 为加强感应器自冷, 在感应圈前端中心位置上装一放水管</p> <p>2. 感应圈与淬火面间隙应尽量小, 一般为 $1 \sim 3\text{mm}$</p> <p>3. 机床导轨面连续淬火感应器应与机床导轨面仿形, 为使吸热快的转角处得到均匀加热, 感应器常按以下附图所示的结构进行设计</p> 
例 29 中频平面 连续淬火感 应器		滚道淬火	<p>1. 感应圈两回线间距一般为 $12 \sim 20\text{mm}$</p> <p>2. 感应圈半圆端头导线应超出淬火滚道边 $\left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2} \right) b_i$, 长, b_i 为感应圈截面宽, 一般为 $8 \sim 18\text{mm}$</p> <p>3. 感应圈与滚道底间隙为 $1.5 \sim 2.5\text{mm}$, 靠近滚道边处间隙适当放大</p> <p>4. 感应器高度 h_i 不宜过大, 一般可取 $\frac{b_i}{2}$</p>	<p>1. 在采用油淬火或较浓的聚乙烯醇淬火时, 常采用辅加喷水头冷却</p> <p>2. 淬火时, 感应圈与淬火面间隙应尽量减少, 一般在 $1 \sim 3\text{mm}$ 选取</p> <p>3. 把感应器制成扭转式(如下图所示), 能提高感应器效率, 但制作困难</p> <p>4. 加热时可加导磁体</p> <p>5. 淬火面有交接软带, 其宽度一般为 $25 \sim 45\text{mm}$</p> 
例 30 中频平面 连续淬火感 应器		滚轮周向 连续淬火	<p>1. 感应圈两回线间距为 $12 \sim 20\text{mm}$, 为改善淬火交接软带, 两回线应与零件轴向成一定角度($40^\circ \sim 55^\circ$)</p> <p>2. 感应圈与滚道中心的间隙应比两端大</p>	<p>1. 因环形件连续淬火后将产生不利的交接软带, 使感应器倾斜一角度后可使交接带亦与工件轴向倾斜一角度, 在滚轮工作时, 软带区将不同时受力, 从而减少软带的有害作用</p> <p>2. 因中频淬硬层较浅, 而滚轮一般受力较大, 故采用整体淬火或工频同时加热表面淬火, 质量较好</p>

(续)

示例	结 构 图	用 途	设计参数	备 注
例 31 中频内孔 连续淬火感 应器		直径 $\phi > 70\text{mm}$ 深孔 淬火	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感应圈外壁与零件的间隙 a 一般为 $2 \sim 3\text{mm}$ 2. 感应圈截面高度 h_i 一般为 $12 \sim 16\text{mm}$ 3. 感应圈的匝间距一般为 $8 \sim 12\text{mm}$ 4. 喷水孔的直径和分布参见表 11-34 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 自喷冷却水孔根据冷却要求不同可钻成一排或二排 2. 为了减少汇流条的能量损失,提高感应器的效率,可制成同心式汇流条的感应器 3. 中频内孔连续淬火感应器亦可制成单匝的,感应器的高度 h_i 一般为 $14 \sim 20\text{mm}$,宽度 b_i 一般为 $9 \sim 14\text{mm}$,间隙 a 一般为 $2 \sim 3\text{mm}$ 4. 嵌加硅钢片导磁体后可以提高感应器的电效率
例 32 中频特殊 感应器		模数 $m > 8\text{mm}$ 的齿 轮淬火	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感应圈与齿部各面间隙 a: 节圆部位 $a = 3 \sim 6\text{mm}$; 齿根部位 $a = 1.5 \sim 2.5\text{mm}$ 2. 感应圈加热齿根部分两竖直导线的长度一般为 $30 \sim 45\text{mm}$ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 淬火的冷却由辅加喷水头进行喷冷 2. 沿齿面连续加热,齿根部分得不到硬化
例 33 中频特殊 感应器		模数 $m > 7\text{mm}$ 的齿 轮淬火	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感应圈与齿沟仿形 2. 感应圈高度 h_i 一般为 $10 \sim 14\text{mm}$; 宽度 b_i 一般为 $4 \sim 6\text{mm}$ 3. 导磁体块由硅钢片叠成,其外形亦与齿沟仿形 4. 固定夹内通水冷却硅钢片,它与齿沟相配合,上下移动时起靠模作用,避免感应圈与零件相碰 5. 喷水孔大小与分布,参见表 11-34、表 11-35 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 淬火冷却方法,依材料的性能决定,对允许直接喷冷的材料,可用自喷冷却;不宜采用喷冷的材料,可附加喷头喷冷相邻两齿面,依靠热传导冷却 2. 这类感应器可用于埋油淬火

(续)

示例	结 构 图	用 途	设计参数	备 注
例 34 中频特殊 感应器		模数 m > 8mm 的齿 轮淬火	1. 感应圈与齿部各面间隙 a : 节圆部位 $a = 1.5 \sim 2.5\text{mm}$; 齿根部位 $a = 0.5 \sim 1.5\text{mm}$ 2. 感应圈加热齿根部分竖 直导线长度(至两端)一般为 20 ~ 30mm, 可根据齿宽和模数 来决定, 竖直导线加长, 齿根加 热温度可以提高, 但加热终止 处(齿根上端)未淬硬区加大	1. 工件淬火冷却应根据材 料的淬硬性来定, 允许直接喷 冷的材料可采用自喷冷却; 不 宜采用直接喷冷的材料, 按结 构图设计辅加喷水头喷冷加 热齿沟的相邻两齿面, 依靠导 热冷却 2. 这类感应器常用于埋油 淬火 3. 采用双回路双三角形感 应器能加强齿根加热, 结构如 下图 
例 35 中频特殊 感应器		滚道、模 数 m > 12mm 的齿 轮淬火	1. 感应圈两回线施感部分 与滚槽或齿沟仿形, 间距为 12 ~ 20mm 2. 感应圈与零件间隙 a : 滚 道淬火时 滚道槽底部 $a = 1 \sim 2\text{mm}$; 滚 道两侧上部 $a = 2 \sim 4\text{mm}$ 齿轮淬火时: 齿根部位 $a = 0.5 \sim 1.5\text{mm}$; 节圆部位 $a = 1.5 \sim 2.5\text{mm}$ 3. 感应圈两回线截面宽度 b_i 为 5 ~ 7mm	1. 淬火时由辅加喷水头冷 却; 大模数齿轮沿齿沟淬火 时, 如齿轮材料不宜采用直接 喷冷, 可附加喷水头喷冷所加 热齿沟的相邻两齿面, 依靠导 热冷却 2. 必须加嵌导磁体, 导磁体 硅钢片应与感应器用云母绝 缘 3. 这类感应器常用手埋油 淬火

4. 感应加热装置(表 11-38 ~ 表 11-69)

表 11-38 感应加热淬火电源和频率的选择

淬硬层深度 /mm	截面尺寸 /mm	电网频率 /Hz 50 或 60	变频器 180Hz	固体电路变频或发电机			真空管式, 大于 200kHz
				1000Hz	3000Hz	10000Hz	
0.38 ~ 1.27	6.35 ~ 25.4	—	—	—	—	—	良好
1.29 ~ 2.54	11.11 ~ 15.88	—	—	—	—	尚可	良好
	15.88 ~ 25.4	—	—	—	—	良好	良好
	25.4 ~ 50.8	—	—	—	尚可	良好	尚可
	> 50.8	—	—	尚可	良好	良好	不良

(续)

淬硬层深度 /mm	截面尺寸 /mm	电网频率 /Hz 50 或 60	变频器 180Hz	固体电路变频或发电机			真空管式, 大于 200kHz
				1000Hz	3000Hz	10000Hz	
2.56 ~ 5.08 穿透淬火	19.05 ~ 50.8	—	—	—	良好	良好	不良
	50.8 ~ 101.6	—	—	良好	良好	尚可	—
	> 101.6	—	—	良好	尚可	不良	—
	1.59 ~ 6.35	—	—	—	—	—	良好
	6.35 ~ 12.7	—	—	—	—	尚可	良好
	12.7 ~ 25.4	—	—	—	尚可	良好	尚可
	25.4 ~ 50.8	—	—	尚可	良好	尚可	—
	50.8 ~ 76.2	—	—	良好	良好	不良	—
	76.2 ~ 152.4	尚可	良好	良好	不良	不良	—
	> 152.4	良好	尚可	不良	不良	不良	—

注:“良好”表示针对给定淬硬层深度加热到奥氏体化温度的最有效频率。穿透加热时,“良好”是指图 11-1 表示的大致相当的 mg/J 量。“尚可”表示针对给定淬硬层深度足以加热到材料奥氏体化温度,但低于合理值的频率。穿透淬火时,“尚可”表示一个低于图 11-1 所示的 mg/J 值。“尚可”也表示一个比合理量稍高的频率。后者在高能量输入时会发生表面过热,变频器的电耗大于正常频率的变频器,某些设备的效率可能降低。“不良”表示会导致表面过热的频率,除非是使用低能量输入,效率和生产率都低,而且变频器的每 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 投资额高。

表 11-39 国内常用感应加热装置的特性

加热装置类别	频率范围 /Hz	功率范围 /kW	设备效率 (%)	热处理应用范围
电子管变频加热装置	高频: $10^3 \sim 10^6$	5 ~ 500	50 ~ 75	脉冲淬火: 表面淬火
	超音频: $10^4 \sim 10^5$	5 ~ 500	50 ~ 75	表面淬火
晶体管变频加热装置 机式变频加热装置 工频加热装置	高频: $10^4 \sim 10^5$	2 ~ 200	75 ~ 92	表面淬火
	中频: $5 \times 10^2 \sim 10^4$	100 ~ 1000	90 ~ 95	表面淬火: 透热热处理
	中频: $5 \times 10^2 \sim 10^4$	15 ~ 1000	70 ~ 85	表面淬火: 透热热处理
	工频: 5×10	50 ~ 4000	70 ~ 90	深层淬火: 透热热处理

表 11-40 电子管式高频、超音频变频装置的型号及主要技术数据

型 号	输入容量 /kVA	振荡功率 /kW	输出功率 /kW	振荡频率 /kHz	冷却水耗量 /L·h ⁻¹	主要用途	设备 组成	设备外形尺寸 (长×宽×高)/mm
GP10—C2	15	10	8	500 ~ 1000	800	淬火, 焊接	振荡柜	800 × 900 × 1500
CP30A—C2	50	30	25	200 ~ 300	1500	淬火、焊接	振荡柜	2200 × 900 × 2000
							整流柜	1200 × 900 × 1200
							变压器	1150 × 800 × 1050
GP60—CR13—2	100	60	50	200 ~ 300	3000	熔炼、淬火	振荡柜 整流柜 调压柜	2200 × 900 × 2000 1600 × 1050 × 2000 800 × 500 × 1400

(续)

型 号	输入容量 /KVA	振荡功率 /kW	输出功率 /kW	振荡频率 /kHz	冷却水耗量 /L·h ⁻¹	主要用途	设备 组成	设备外形尺寸 (长×宽×高)/mm
GP100—CM	180	100	85	200 ~ 300	3200	淬火、焊接	振荡柜 整流柜 调压柜	2200×900×2000 1600×1050×2000 600×400×1300
GP200—C2	400	200	170	150 50	800	淬火、焊接	振荡柜 整流柜 输出柜 输出柜	1600×2000×2200 1600×2000×1800 600×670×1500 600×670×1500
CHYP60—C2	100	60	50	30 ~ 40	3500	淬火、焊接	振荡柜 输出柜	1100×800×2000 600×600×1200
CHYP100—C2	180	100	85	30 ~ 40	3500	淬火、焊接	振荡柜 输出柜	1100×800×2000 600×600×1200
CHYP100—C3	180	100	85	30 ~ 40	4000	淬火、焊接	振荡柜 整流柜 配电柜 调压柜 输出柜	2200×900×2000 1600×1050×2000 1000×500×2000 600×400×1300 600×600×1200
GGC80—2A	160	100	80	200 ~ 300	150L·min	淬火、焊接	振荡柜 整流柜	2100×800×1900 1500×1200×1900

表 11-41 晶体管式高频变频装置的一些技术数据

型 号	电 源	输入容量 /kVA	输出功率 /kW	工作频率 /kHz	冷却水耗量 /L·min ⁻¹	
	相数、电压、频率					
TG8		12	8	300 ~ 400		
TG20		30	20	100 ~ 200	25	
TG40		60	40			
TG60		90	60		40	
TG80		120	80			
JGP10		14.5	10	350	20	
JGP25		30	25	100 ~ 200	30	
JGP30		40	30			
JGP45		60	45			50
JGP50		70	50			
JGP75		100	75		60	
JGP100		130	100			75
JGP150		200	150			
JGP200		270	200		115	
JGP250		320	250			150

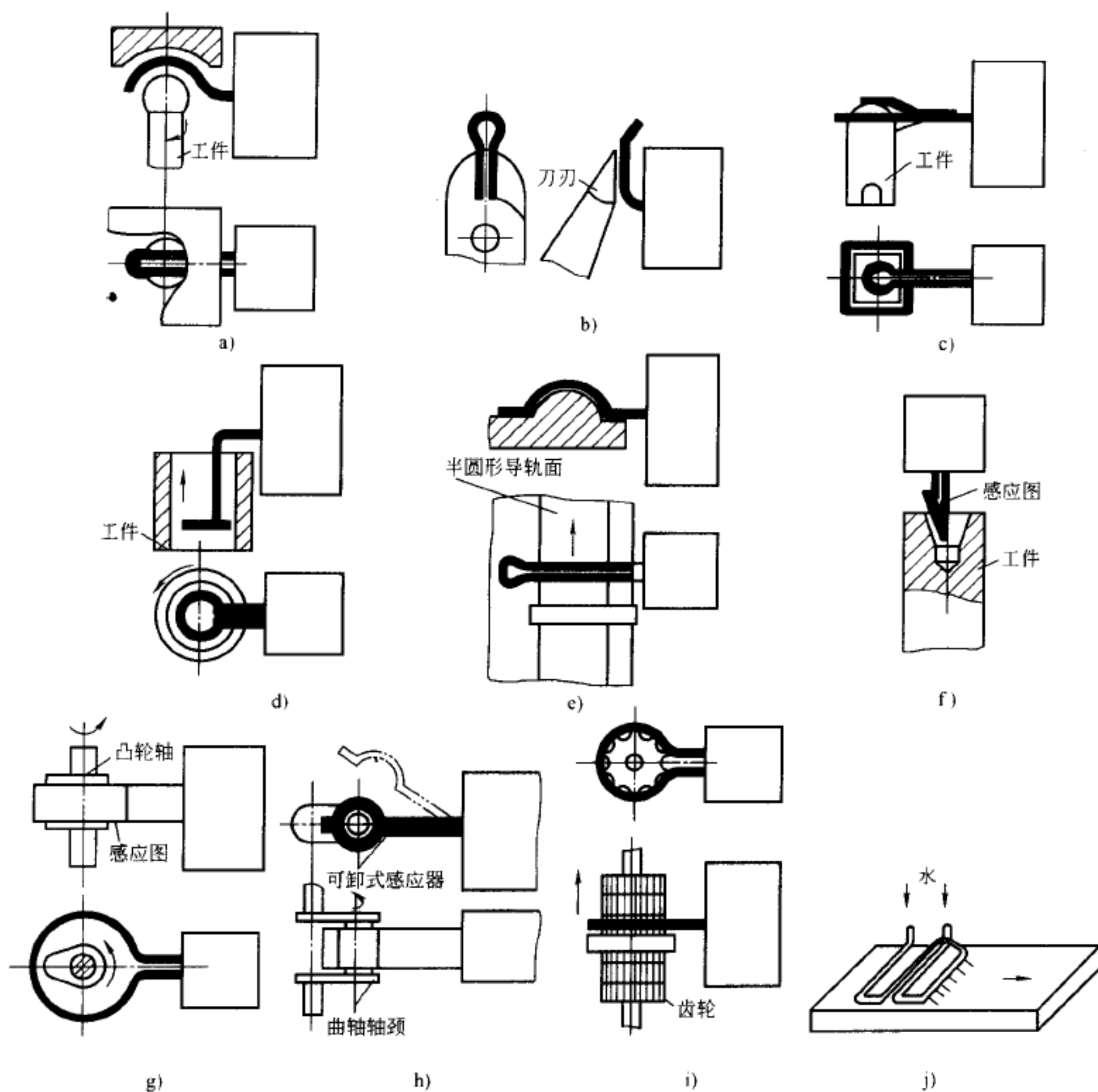


图 11-14 常用感应器几何形状与工件硬化部位的对应关系

- a) 万向节球接头表面淬火 b) 刀刃表面淬火 c) 锻锤锤头表面淬火 d) 内孔表面淬火
e) 圆弧面导轨表面淬火 f) 锥孔内表面淬火 g) 凸轮表面淬火 h) 曲轴轴颈表面淬火
i) 小模数齿轮表面淬火 j) 平面表面加热淬火

表 11-42 晶体管(IGBT)式超音频变频装置数据

型 号	电 源	输入容量 /kVA	输出功率 /kW	工作频率 /kHz	冷却水耗量 /L·min ⁻¹
	相数、电压、频率				
JGP100—1	3 相、 380V、 50Hz	130	100	10、20、30	50
JGP150—1		195	150		60
JGP200—1		260	200		70
JGP250—1		330	250		80

表 11-43 国产机式变频装置

型 号	输出功率 /kW	变频机电压/V		额定频率 /Hz	中频电容 器总容量 /kF	冷却水压力 /kPa
		电动机	发电机			
DGF—C—52—2	50	380	750	2500	750	196 ~ 294
DGF—C—102—2	100	380	750	2500	750	196 ~ 294
DGF—C—162—2	160	380	750	2500	1750	196 ~ 294
DGF—C—252—2	250	6000	750	2500	1750	196 ~ 294
DGF—C—322—2	2 × 160	380	750	2500	2 × 1750	196 ~ 294
DGF—C—502—2	500	6000	750	2500	3000	196 ~ 294
DGF—C—108—2	100	380	750	8000	960	196 ~ 294
DGF—C—168—2	160	380	750	8000	960	196 ~ 294
DGF—C—208—2	2 × 100	380	750	8000	2 × 960	196 ~ 294
DGC—40/4	40	380/220	600/300	4000	800	147 ~ 245
DGC—100/2.5	100	380/220	760/380	2500	1000	147 ~ 245
DGC—200/2.5	200	6000/3000	760/380	2500	1440	147 ~ 245
DGC—250/1	250	6000/3000	760/380	1000	1440	147 ~ 245
DGC—400/2.5	2 × 200	6000/3000	760/380	2500	2880	147 ~ 245
DGC—500/1	2 × 250	6000/3000	760/380	1000	2880	147 ~ 245
DGF—T252—3	250	6000	750	2500	2500	196 ~ 294
DGF—T—501—2	500	6000	750	1000	3600	196 ~ 294
DGT—40/4	40	380/220	600/300	4000	800	147 ~ 245
DGT—100/2.5	100	380/220	760/380	2500	1000	147 ~ 245
DGT—200/2.5	200	6000/3000	760/380	2500	1440	147 ~ 245
DGT—400/1	250	6000/3000	760/380	1000	1440	147 ~ 245
DGT—400/2.5	2 × 200	6000/3000	760/380	2500	2880	147 ~ 245
DGT—500/1	2 × 250	6000/3000	760/380	1000	2880	147 ~ 245

表 11-44 国产机式中频变频机组

型 号	单相中频输出					三相工频输入				直流励磁		转速/ $r \cdot \min^{-1}$	满载 效率 (%)	耗水 量/ (t/h)	外形尺寸 (长 × 宽 × 高) /mm
	功率 /kW	电压 /V	电流 /A	功率 因数	频率 /Hz	功率 /kW	电压 /V	电流 /A	功率 因数	电压 /V	电流 /A				
BPS—50/2500	50	750/375	74/148	0.9	2500	65	380	110	0.9	110/55	3.5/7	2970	77	1.5	φ900 × 1200
BPSD—100/2500	100	750/375	148/296	0.9	2500	130	380	217	0.91	110/55	3.7/7	2970	77	2.6	φ1000 × 1458

(续)

型 号	单相中频输出					三相工频输入				直流励磁		转速/ $r \cdot \min^{-1}$	满载 效率 (%)	耗水 量/ (t/h)	外形尺寸 (长×宽 ×高) /mm
	功率 /kW	电压 /V	电流 /A	功率 因数	频率 /Hz	功率 /kW	电压 /V	电流 /A	功率 因数	电压 /V	电流 /A				
BPSD—100/8000	100	750/375	148/296	0.9	8000	135	380	226	0.91	110/55	4.5/9.0	2970	74	2.8	$\phi 1000 \times 1458$
BPSD—160/2500	160	750/375	237/474	0.9	2500	208	380	348	0.91	110/55	4/8	2970	77	3	$\phi 1000 \times 1558$
BPSD—160/8000	160	750/375	214/428	1.0	8000	216	380	342	0.936	110/55	5.6/11.2	2970	74	4	$\phi 1000 \times 1558$
BPS—250/2500 —1	250	1500/750	185/370	0.9	2500	290	6000	31.7	0.91	110/55	3.3/6.6	2970	86	5.5	$\phi 1200 \times 2070$
BPS—500/1000	500	1500/750	350/700	0.95	1000	592	6000	62.5	0.912	220/110	4.5/9.0	2970	84	7.5	$\phi 1460 \times 2050$
BPS—500/2500	500	1500/750	370/740	0.9	2500	600	6000	62.5	0.917	220/110	5.1/10.2	2974	84	7.5	$\phi 1460 \times 2050$
BPS—600/2500	600	1500/750	444/888	0.9	2500	715	6000	76.5	0.91	220/110	5.3/10.6	2974	84	9.5	$\phi 1460 \times 2050$
BPW—40/4	40	600/300	74/148	0.95	4000	54	380	97	0.85	60	5	2970	74	0.6	1125×1160 ×1090
BPW—50/2.5	50	750/375	74/148	0.95	2500	67	380	118	0.86	60	6	2970	75	0.6	1125×1160 ×1090
BPW—100/2.5	100	750/375	148/296	0.95	2500	130	380	227	0.87	60	7	2970	77	0.9	1385×1160 ×1090
BPL—200/2.5	200	760/380	275/550	0.95	2500	250	6000	27	0.9	110	7	2970	80	3.5	$\phi 1100 \times 2800$
BPL—200/2.5	200	760/380	275/550	0.95	2500	250	3000	54	0.9	110	7	2970	80	3.5	$\phi 1100 \times 2800$
BPL—250/1	250	760/380	346/692	0.95	1000	300	6000	32	0.9	110	8	2970	83	4	$\phi 1100 \times 2800$
BPL—250/1	250	760/380	346/692	0.95	1000	300	3000	64	0.9	110	8	2970	83	4	$\phi 1100 \times 2800$

表 11-45 国产中频淬火变压器规格

型 号	视在功率/kVA	使用频率/Hz	额定电压/V	变比系数
GR500—2.5	450	2500	750	(10~34)/1
GR500—8	450	8000	750	(10~34)/1
Z ₁ B ₂ —500	500	2500/8000	375/750	(10~34)/1
Z ₁ B ₂ —1000	1000	1000/2500	750	(10~63)/(1~2)
GR—1000	1000/750	2500/8000	750	(10,15,25)/(1~2)
GR—2000	2000	2500/8000	750	(5~38)/1 (1,3,13,33)/1
GR—1000—8	900	8000	750	(10~63)/(1~2)
GR—800	750/600	2500/8000	750	(10~34)/(1~2)

表 11-46 TZR 铁氧体中频淬火变压器

型 号	视在功率/kVA	使用频率/Hz	额定电压/V	变比系数	重量/kg	外形尺寸 (长×宽×高)/mm
TZR—300	300	2500/8000	750	21/1	30	317×196×234

(续)

型 号	视在功率/kVA	使用频率/Hz	额定电压/V	变比系数	重量/kg	外形尺寸 (长×宽×高)/mm
TZR—500	500	2500/8000	750	27/1	50	419×228×252
TZR—500A	500	2500/8000	750	43/1	66	340×276×340
TZR—500B	500	2500/8000	750	18/2	53	307×286×290
TZR—500C	500	2500/8000	750	11/1	34	397×108×386
TZR—1000	1000	2500/8000	750	19/2	65	344×367×330
TZR—1000A	1000	2500/8000	750	27/1	94	384×372×318
TZR—2000	2000	250/800	750	10/9	120	340×428×400

表 11-47 国产中频电热电容器规格

型 号	额定电压 /V	工作频率 /Hz	标准容量 /kVAR	电 容					
				总的	各 级 的				
					01	02	03	04	05
RYS0.375—125—2.5	375/750	2500	125	56.7	14.17	14.17	14.17	14.17	—
RYS0.5—125—2.5	500/1000	2500	125	31.9	7.98	7.98	7.98	7.98	—
RYS0.75—125—2.5	750/1500	2500	125	14.2	3.55	3.55	3.55	3.55	—
RYS0.375—160—8	375/750	8000	160	22.7	5.67	5.67	5.67	5.67	—
RYS0.5—160—8	500/1000	8000	160	12.72	3.18	3.18	3.18	3.18	—
RYST0.375—125—2.5	375	2500	125	56.2	21.3	4.73	9.45	2.363	18.9
RYST0.5—125—2.5	500	2500	125	31.9	11.97	2.66	5.32	1.33	10.64
RYST0.75—125—2.5	750	2500	125	14.2	5.32	1.18	2.37	0.59	4.74
RYST0.375—160—8	375	8000	160	22.7	8.5	1.89	3.78	0.945	7.58
RYST0.5—160—8	500	8000	160	12.72	4.77	1.06	2.12	0.53	4.24

表 11-48 几种晶闸管式中频变频装置的主要技术数据

主要参数	型 号						
	KGPS100	KGPS200	KGPS250	KGPS350	KGPS500	KGPS750	KGPS1000
	/1.0	/1.0	/1.0	/0.5	/0.5	/0.5	/0.5
	2.5、4.0 8.0	2.5、4.0 8.0	2.5、4.0 8.0	1.0、2.5 4.0、8.0	1.0、2.5 4.0	1.0、2.5 4.0	1.0、2.5
输入电源	三相、380V、50Hz						
输入最大电流/A	200	390	480	680	960	1400	1900
额定输出功率/kW	100	160	250	350	500	750	1000
额定输出电压/V	700	700	700	700	700	700	700
最高输出电压/V	750	750	750	750	750	750	750
标准输出频率/Hz				500	500	500	500
	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500
	4000	4000	4000	4000	4000		
	8000	8000	8000	8000			

(续)

主要参数	型 号						
	KGPS100 /1.0 2.5、4.0 8.0	KGPS200 /1.0 2.5、4.0 8.0	KGPS250 /1.0 2.5、4.0 8.0	KGPS350 /0.5 1.0、2.5 4.0、8.0	KGPS500 /0.5 1.0、2.5 4.0	KGPS750 /0.5 1.0、2.5 4.0	KGPS1000 /0.5 1.0、2.5
额定直流电压/V	500	500	500	500	500	500	500
额定直流电流/A	200	400	500	700	1000	1500	2000
变频效率	$f \leq 2500\text{Hz}; \eta \geq 92\%; f \leq 4000\text{Hz}; \eta \geq 90\%; f \leq 8000\text{Hz}; \eta \geq 85\%$						
外形尺寸	长/m	1.60	1.60	1.60	2.60	2.60	3.20
	宽/m	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
	高/m	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20

表 11-49 高频装置定期维修项目

名称	检修项目	检修间隔期/h	检 修 内 容
振荡器	栅极电路移相电路及栅极电阻	500	检查栅极电阻,旁路电容,移相电容、耦合电容电极夹得松紧,并清除积尘
振荡器	反馈线圈	200	检查引线是否有接头松动现象
	耦合线圈	700	检查固定线圈和可动线圈之间是否有碰上的可能。检查调整时的灵活性和可靠性,螺丝是否有松动
	槽路电容	700	清除积尘和油污,补充内部的变压器油。检查电极夹的松紧,消除一切爬电的可能
	高频变压器	300 ~ 500	一次侧、二次侧间的绝缘消除积尘
振荡器	高频引线	200 ~ 300	检查是否有接触松动和绝缘支柱是否有损坏
	熔炉	500	检查构架接地线及高频引线,闸刀刀片的接触
	电子管屏损	700	在正常输出的情况下测量进出口水温,计算屏耗及效率
振荡管	清洗屏极水垢	3 ~ 6 个月	用 10% 盐酸水溶液洗净,再用温水冲击残留的酸液
	电子管水套	300 ~ 500	检查进、出水水口的腐蚀情况,采取防腐蚀措施
	水压继电器	200 ~ 300	检查动作灵敏性和动作压力范围
	进出口水管道	500	测量水流量及对地电阻,清洗管道,管子各处接头有无渗水漏水
	检查水阀门	300	检查其开闭灵活性,漏水和渗水
	循环水	700	检查水的硬度

表 11-50 晶体管式高频变频装置调试过程中所遇故障分析及处理方法

故障现象	原 因	处 理 方 法
给定后,只有直流电流表有指示,直流电压表不动	1. SIT(静电压应晶体管)损坏 2. 高速二极管损坏 3. 反相器输出短路	1. 用万用表检查 SIT,检查驱动板是否有打火痕迹 2. 用万用表检查高速二极管是否损坏 3. 检查反相器各部输出汇流条之间绝缘情况
给定后,只有直流电压表指示直流电流表无指示	1. 加热线圈破坏 2. 输出导线断线 3. 谐振电容器断路 4. 锁相环路信号放大器不良	1. 检查加热线圈 2. 检查输出导线 3. 检查谐振电容器是否有打火现象 4. 更换锁相环路信号放大器

(续)

故障现象	原 因	处 理 方 法
刚接通加热,主断路器就跳闸	1. 变压器绝缘不良 2. SIT 驱动不良 3. 主断路器不良 4. 主电路有短路部分	1. 检查变压器内部是否有打火痕迹 2. 检查 SIT 驱动电路及输出波形 3. 更换主断路器 4. 用万用表检查主电路是否有接地现象
刚接通加热,主断路器就因过流而跳闸	1. 整流部分晶闸管损坏 2. SIT 损坏	1. 检查晶闸管情况 2. 用万用表检查 SIT 及其驱动电路 3. 观察主电路是否有打火痕迹
直流电压表、直流电流表摆动	变压器绝缘不良及信号线接触不良	检查变压器是否有打火痕迹及变压器与锁相环控制线路各板之间的接线情况
与设定值比输出不正确	1. 晶体管门线接触不良及断线 2. 开关电源不良 3. 直流电压或直流电流检测器不良 4. 调动电位器损坏	1. 切断主电路检查晶体管门线接线情况 2. 用示波器观察加热状态下的直流电流及直流电压的波形 3. 检查或更换直流电流检测器,或直流电压检测器 4. 波形头应为 6 波头,如缺少则表明晶体管损坏或门线接触不良 5. 更换开关电源 6. 检查直流电压,直流电流检测器,如损坏更换 7. 更换调功电位器
接通加热几秒钟后断开,回到启动状态	1. 加热线圈安装绝缘不良或烧断 2. 变压器绝缘不良 3. 耦合部以后处有火花 SIT 烧坏 4. 整流部晶闸管损坏	1. 检查加热线圈 2. 检查变压器是否有打火痕迹 3. 用万用表检查 SIT 及其驱动电路情况 4. 检查晶闸管情况

表 11-51 中频感应加热装置常见故障举例

序号	故 障	产 生 原 因	处 理 方 法
1	电动机启动不了 1. 空气开关不工作 2. 空气开关换接不好,不能全压启动或启动时间过长	1. 联锁触点未接好 2. 衔铁转角不大 3. 空气开关辅助触点接触不好 4. 电流继电器未调整好或触点接触不良	1. 检查水压继电器及各联锁触点进行维修 2. 调整衔铁转角 3. 修理触点 4. 调整电流继电器
2	增加励磁时发电机不发电	1. 自耦变压器或变阻器接触不良 2. 励磁绕组有断线 3. 磁放大机有故障 4. 各控制电路、触点、熔体(保险丝)故障	1. 检修自耦变压器或变阻器 2. 检查断线进行修理 3. 检查放大机特性和旋转方向 4. 检查各元件可靠性并修理之
3	电流不正常增大	感应器匝间短路	检修感应器匝间绝缘
4	电压表没有指示,过电流继电器动作	电容器有击穿	更换电容器

(续)

序号	故 障	产 生 原 因	处 理 方 法
5	发电机功率提不高	励磁回路整流器不好压降太大	检查更换整流器
6	功率因数超前调不回去	固定电容器太多	减少固定电容器组电容量

表 11-52 晶闸管整流电路常见故障

故 障 现 象	产 生 原 因	处 理 方 法
快速熔断器熔断	1. 整流桥某晶闸管反向击穿 2. 逆变失败时,过流保护失灵 3. 波形不正常,触发板脉冲角不对	1. 用万用表查晶闸管反向电阻 2. 整定对流保护 3. 调整触发线路
晶闸管烧坏	1. 过流保护失灵 2. 快速熔断器与晶闸管过载特性不配合	1. 整定过流保护 2. 更换快速熔断器
整流电压缺相	1. 触发脉冲失落或触发功率不够 2. 晶闸管损坏 3. 三相交流电源一相断线	1. 用示波器检查触发波形 2. 用万用表检查控制表与阴极间电阻 3. 用万用表或试电笔检查
整流电压跳动	1. 有干扰信号,促使晶闸管误导通 2. 晶闸管可触发电压电流太小或正向阻断能力不足 3. 晶闸管两端阻容保护开路 4. 晶闸管温升太高,正向电压下降	1. 排除干扰信号来源 2. 更换不合格晶闸管 3. 检查阻容保护 4. 检查冷却系统

表 11-53 逆变电路常见故障

故 障 现 象	产 生 原 因	处 理 方 法
中频功率升不上去,功率不够或过流保护动作	1. 直流电流小,负载等效电阻太大 2. 直流电压很小,负载等效电阻偏小 3. 负载阻抗不适合,过流保护动作 4. 逆变触发器受干扰,过流保护动作	1. 调整负载阻抗 2. 排除触发器干扰
逆变桥关不断	晶闸管性能不稳定或变质	1. 更换晶闸管 2. 检查所有晶闸管关断时间
逆变桥臂不导通	1. 触发系统出现故障 2. 晶闸管控制极开路或短路以及控制极内阻过大	1. 逐级检查触发系统波形,查出故障点 2. 用万用表检查晶闸管控制极与阴极间电阻
逆变桥相串联的一只晶闸管关不断	1. 晶闸管外部发热情况不良 2. 晶闸管内耗增加	1. 改善冷却条件 2. 更换晶闸管
晶闸管开通时间不一致	1. 触发脉冲前沿不同 2. 两只串联的晶闸管触发灵敏度相差太大	1. 提高触发脉冲前沿 2. 选择性能相近的晶闸管
晶闸管反压分配不均	晶闸管反向阻断特性不同	选择性能相近的晶闸管

表 11-54 机械式通用淬火机床的技术规格

技术参数	型 号		技术参数	型 号	
	GCJ1020	GCJ1050		GCJ1020	GCJ1050
最大夹持工件长度/mm	1200	1500	主轴转速/(r/min)	20 ~ 150	
滑板最大行程/mm	1300	1600	进给电动机功率/kW	1.5	
最大淬火工件直径/mm	400		主轴电动机功率/kW	0.335	
最大工件重量/kg	150		机床净重/t	2.0	2.5
滑板进给速度/mm·s ⁻¹	2 ~ 30		外形尺寸(长×宽×高) /mm×mm×mm	1675×780	1675×780
滑板最快速度/mm·s ⁻¹	100			×2900	×3500

表 11-55 国内专业厂生产的液压式通用淬火机床的技术规格

型 号	最大夹持长度 /mm	最大加热长度 /mm	最大加热直径 /mm	最大工件重量 /kg	工件移动速度 /mm·s ⁻¹	快速返回速度 /mm·s ⁻¹	快速下降速度 /mm·s ⁻¹	工作旋转速度 /r·min ⁻¹	机床电机总功率/kW	机床重量 /t	机床外形尺寸 (长×宽×高) /mm		
GC1080C	800	800	400	100	1~30	60	110	20~150	2.5	1.8	1466×590×7560		
GCT10120A	1200	1200								2.0	1466×590×3370		
GCT10180Q	1800	1800								500	150	2.5	1610×800×4560
GCYK1050	500	500	400	150	1~30	110	250	20~200	2.2	1.2	1220×875×2100		
GCY1050			600							1.35	1290×925×2100		
GCYK1050/60													
GCY1050/60													
GCY10100	1000	1000	400							1.6	1220×875×3100		
GCY10100			600									1.8	1290×925×4100
GCYK10100/60													
GCY10100/60	1200	1200	400							2.0	1290×875×4100		
GCYK10120													
GCY10120													
GCYK10150	1500	1500								2.2	1290×875×4100		
GCY10150													
GCYK10200												2000	2000
GCY10200													

注:K表示控制特性为数字控制。

表 11-56 GCFW 型通用立式中频淬火机床的技术规格

型 号	最大夹持长度/mm	最大加热长度/mm	最大加热直径/mm	最大工件重量/kg	传动结构方式	冷却方式	机床外形尺寸 (长×宽×高)/mm
GCFW11200/120—W	2000		1200	10000	复合式	喷淋、埋液	2510×2010×5670
GCFW11350/120—W	3500		1200	20000	复合式	喷淋、埋液	3510×2010×4160

注:此类淬火机床主要用于轴径、大齿轮单点淬火。

表 11-57 $\phi 800\text{mm} \times 700\text{mm}$ 中频 $\phi 1500\text{mm} \times 700\text{mm}$ 工频 轴类淬火机床主要技术数据

项 目		数 据	
		$\phi 800 \times 7000$ 中频机床	$\phi 1500 \times 7000$ 工频机床
淬火工件直径/mm		100 ~ 800	235 ~ 1485
淬火齿轮轴模数 m		8 ~ 50	
上下顶尖最大距离/mm		7000	7000
感应横梁最大行程/mm		6050	6830
淬火工件最大重量/t		10	60
感应横梁升降速度/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$		0.8 ~ 20	0.6 ~ 12
扶架横梁升降速度/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$		0.8 ~ 20	0.6 ~ 12
主轴转速/(r/min)		15 ~ 60	10 ~ 50
上顶尖滑板移动速度/ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$		16	16
抱辊开合角开合速度/ $(^\circ) \cdot \text{s}^{-1}$		1.6	1.6
感应器横梁及扶架横梁升降电动机	型号	JZT—7.5	JZT—7.5
	功率/kW	7.5	7.5
	额定转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	1400	1400
	调速范围/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	90 ~ 1415	65 ~ 1300
主轴转动电动机	型号	JZT—7.5	JZT—7.5
	功率/kW	7.5	7.5
	额定转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	1400	1400
	调速范围/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	243 ~ 1215	243 ~ 1215
抱辊及上顶尖滑板移动电动机	型号	JD41—6	JD41—6
	功率/kW	1.0	1.0
	额定转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	940	940
	U_0 —20 减速器速比	6.07	6.07
专用减速器速比	至感应器横梁	23.56/38.9	23.56/38.9
	至扶架横梁	24.72/40.81	24.72/40.81
机床总重/t			47.83

表 11-58 $\phi 600\text{mm} \times 3500\text{mm}$ 轴类淬火机床技术数据

上顶尖及挟持装置		工作台装置		感应器装置		附件分度装置
上顶尖移动速度	$v = 1.675\text{m/min}$	旋转速度(四级)/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$		感应器移动无级调速		分度范围 2 ~ 100 齿
上顶尖移动电动机	$P = 2.8\text{kW}$ $n = 1420\text{r/min}$ J042—4	$n_1 = 25.5$ $n_3 = 64.4$	$n_2 = 41$ $n_4 = 103.3$	0.5 ~ 30mm/min		淬火零件规格范围
				感应器移动电动机	$P = 5.5\text{kW}$ $n = 750\text{r/min}$ Z2—62	最大直径 $\phi 600(\text{mm})$ 最小直径 $\phi 40(\text{mm})$

(续)

上顶尖及挟持装置		工作台装置		感应器装置		附件分度装置
扶持架移动	$v = 1.885\text{m/min}$	工作台旋转电动机	$P = 4.5\text{kW}$ $n = 730\text{r/min}$ J062—8	测速电动机	$P = 0.4\text{kW}$ $n = 1500\text{r/min}$ Z2—11	最大长度 3500(mm) 最小长度 500(mm) 最大重量 7000(kg)
扶持架移动电动机	$P = 2.8\text{kW}$ $n = 1420\text{r/min}$ J042—4					
气缸工作压力	$p = 583.4\text{kPa}$	机动旋转允许工作的 最大重量为 4000kg		调速范围 电动机 $D = 15$ 机械 $i = 4$		

表 11-59 $\phi 1000\text{mm} \times 500\text{mm}$ 工频轴类立式淬火机床主要技术数据

项 目		数 据
淬火工件直径/mm		200 ~ 1000
最大顶尖距离/mm		5000
机床最大件承重/t		20
感应器横梁最大行程/mm		4850
感应器横梁升降速度/ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$		33 ~ 548
扶架横梁升降速度/ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$		31.6 ~ 522
工件转动速度/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$		7.9 ~ 39.7
抱辊开合角开合速度/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$		0.32
感应器及扶架横梁升降用电动机	型号	Z2—52
	功率/kW	7.5
	转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	100 ~ 1000
测感应器横梁升降位置用整角机	型号	S—5、S—3
	额定励磁电压/V	220
感应器横梁测速电动机	型号	ZCF—361
	额定转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	1100
	电枢电压/V	106
专用减速器速比	至感应器横梁	23.56/38.9
	至扶架横梁	24.72/40.81
机床总重/t		34.873

表 11-60 国内专业厂生产的双工位淬火机床的技术规格

型 号	最大夹持长度/mm	最大加热长度/mm	最大加热直径/mm	最大工件重量/kg	工件移动速度/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	工作旋转速度/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	机床重量/t	机床外形尺寸(长×宽×高)/mm
GC1080	800		400	160	1 ~ 20	20 ~ 200	1.6	1998 × 700 × 2460
GCZ72—5/Ⅱ	100		110	10	10 ~ 50	120	1.5	1600 × 1350 × 1830

表 11-61 卧式轴类淬火机床主要技术数据

项 目	数 据	项 目	数 据
最大工件直径/mm	1600	花盘低速及感应器移动电动机	JZS 型三相整流电动机
顶尖间最大距离/mm	800	功率/kW	1.7、0~3
机床最大负荷/t	30	转速/ $r \cdot \min^{-1}$	1430、0~1800
感应器移动速度(无级调速)/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	0.5~22.5	分齿定位传动方式	液压
低转速(无级)/ $r \cdot \min^{-1}$	0.02~1.5	液压传动电动机功率/kW	1.5
高转速(4级变速)/ $r \cdot \min^{-1}$	1.7、25.7、38.5、58.5	床头箱润滑油泵电动机功率/kW	0.25
尾座移动速度/ $r \cdot \min^{-1}$	3000	机床外形尺寸(长×宽×高)/mm	12461×3580×2456
花盘高速传动电动机功率/kW	14	机床总重/kg	35367
转速/ $r \cdot \min^{-1}$	970		

表 11-62 GC—1205 型轴及齿轮通用淬火机床技术数据

项 目	数 据	备 注	项 目	数 据	备 注
淬火工件最大外径/mm	500		拖板行程/mm	1100	
淬火工件最大长度/mm	1200		尾架导轨面至主轴中心距离/ mm	345	
淬火工件最大重量/kg	50		电动机功率/kW	1.5	直流
主轴转动速度/ $r \cdot \min^{-1}$	5~250	晶闸管无级调速	电动机转速/ $r \cdot \min^{-1}$	1500	
拖板滑动速度/ $\text{mm} \cdot \min^{-1}$	20~1300	晶闸管无级调速	机床总重/t	2.8	
尾架移动速度/ $\text{mm} \cdot \min^{-1}$	35~750	晶闸管无级调速			

表 11-63 $\phi 500\text{mm} \times 1500\text{mm}$ 高频淬火机床主要技术数据

项 目	数 据	备 注	项 目	数 据	备 注
淬火轴类件最大长度/mm	1500		电动机功率/kW	1.1	
淬火轴类件最大直径/mm	100		电动机转速/ $r \cdot \min^{-1}$	3000	
淬火齿轮件最大直径/mm	500		工件上升速度/ $\text{mm} \cdot \min^{-1}$	10~15	
淬火齿轮件最大齿宽/mm	100		工件下降速度/ $\text{mm} \cdot \min^{-1}$	0~7	
淬火齿轮件最大模数	8		工件上下移动用电动机		型号 Z2—12
淬火工件旋转速度/ $r \cdot \min^{-1}$	10~80		电动机功率/kW	1.5	
工件旋转用电动机		型号 Z2—42	电动机转速/ $r \cdot \min^{-1}$	750	

表 11-64 $\phi 400\text{mm} \times 2000\text{mm}$ 通用淬火机床主要技术数据

项 目	数 据	备 注	项 目	数 据	备 注
淬火工件最大长度/mm	2000		主轴转速/ $r \cdot \min^{-1}$	2~2400	
淬火长轴最大直径/mm	200~300		上顶尖升降电动机功率/kW	1.5	转速 1425r/min
淬火齿轮最大直径/mm	300~400		拖板升降电动机功率/kW	2.2	转速 935r/min
淬轴时轴向 移动速度	$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	0.3~50 慢速(工作行程)	油泵(单级叶片泵 YBA26B— FL/kW)	2.2	转速 935r/min
	$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	1.5~200 快速(空行程)	主轴用油马达流量/ $\text{L} \cdot \min^{-1}$	21	压力:4.9MPa
淬齿轮上升速度/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	0~133	无级调速	机床总重/t	3.36	转速: 2~2400r/min
淬齿轮下降速度/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	300				

表 11-65 W₁G₁ 齿轮淬火机床主要技术数据

项 目	数 据	备 注	项 目	数 据	备 注
淬火齿轮模数	6 ~ 55		同时淬火时间/s	20 ~ 600	无级
淬火圆柱齿轮直径/mm	500 ~ 2100		工作台垂直移动最大行程/mm	500	
淬火锥齿轮直径/mm	500 ~ 1300		工作台水平移动最大行程/mm	850	
淬火齿轮最大齿宽/mm	4000		变压器垂直移动最大行程/mm	450	
淬火圆柱齿轮螺旋角/(°)	0 ~ 45		定位器垂直移动最大行程/mm	800	
淬火锥齿轮的斜角/(°)	0 ~ 35		变压器回转角度/(°)	± 40	
淬火齿轮最大重量/kg	400		机床外形尺寸(长×宽×高)/mm	5340×1458 × 3360	
工作台垂直与水平移动速度/ mm·s ⁻¹	0.5 ~ 20	油压、无级			
连续延时淬火的延续时间/s	2 ~ 60	无级	机床总重/t	9.10	

表 11-66 GC—2405 感应加热淬火机床主要技术数据

项 目		数 据	备 注
淬火工件最大长度/mm		2400	
淬火工件 最大直径	主轴上/mm	500	
	工作台上/mm	2000	
淬火工件 最大重量	升降淬火/kg	70	
	不升降淬火/kg	1000	
	工作台上/kg	1500	
感应器 移动速度	纵向/mm·min ⁻¹	20 ~ 1800	无级调速
	横向/mm·min ⁻¹	1800	
定位器移动速度/mm·min ⁻¹		1200	
尾架移 动速度	纵向/mm·min ⁻¹	60 ~ 1800	无级调速
	横向/mm·min ⁻¹	800	
淬火工件 旋转速度	主轴上 I 档/r·min ⁻¹	10 ~ 300	无级调速
	主轴上 II 档/r·min ⁻¹	0.02 ~ 0.6	无级调速
	工作台上/r·min ⁻¹	0.01 ~ 0.3	无级调速
感应器 行程	纵向/mm	2400	
	横向/mm	1350	
主轴行程	/mm	120	
定位器行程	/mm	100	
驱动电动 机功率	主轴旋转及升降/kW	1.5	Z2—31
	感应器及尾架升降/kW	1.5	Z2—31
	感应器横向移动/kW	1.1	J02—21—4
	定位器伸缩/kW	0.25	A06624
	工作台转盘旋转/kW	0.4	Z2—11
	尾架横向移动/kW	0.55	A07112

表 11-67 GC1250 型曲轴淬火机床主要技术数据

项 目		数 据	备 注
最大零件安装长度/mm		1500	
最大零件回转直径/mm		300	
曲轴最大半冲程/mm		100	浸液合适
最大零件重(4件)/kg		600	
零件主轴转速(两件)/ $r \cdot \min^{-1}$		30/60	
淬火变压器	容量/KVA	500	
	匝比	2/8 ~ 2/27	
中频补偿电容量/ μF		16.2 ~ 27.58	
电机总容量/kW		8.3	
机床重/t		4.0	

表 11-68 中频通用淬火机床主要技术数据

项 目			数 据	备 注
可淬轴 类工件	最大长度/mm		3000	
	最大直径/mm		350	
	最大重量/kg		3000	
可淬齿轮 类工件	最大模数		8 ~ 40	
	螺旋角/(°)		0 ~ 45	
	在顶尖间:直径/mm		φ200 ~ φ550	
	在工作 台上	直径/mm	φ550 ~ φ3000	
		最大重量/kg	8000	
最应器及分度机构移动速度/mm·min ⁻¹			39 ~ 690	无级调速
感应器 移动范围	上下行程/mm		3000	电动
	前后、左右移动/(°)		0 ~ 156	手动
	水平移动/(°)		0 ~ 60	手动
分度机构	定位器前后移动/mm		0 ~ 90	液压
	定位器切向移动分齿/mm		0 ~ 150	
下顶尖旋转速度/r·min ⁻¹			20 ~ 60	
工作台圆盘回转角度/(°)			360	5.5kW 直流电机
工作台最大移动距离/mm			1500	

表 11-69 气缸套双工位淬火机床主要技术数据

项 目		数 据	备 注	项 目		数 据	备 注
淬火工件尺寸	外径/mm	180		升降用电动机功率及数量/kW		1 × 2	
	内径/mm	145		旋转用电动机功率及数量/kW		0.27 × 2	
	高度/mm	380		生产率/个 $\cdot h^{-1}$		40 ~ 50	
电源功率/kW		170		水消耗量/ $m^3 \cdot h^{-1}$		10	0.4 ~ 0.5MPa
电源频率/Hz		8000		机床总重/t		2.0	

11.2 火焰加热热处理工艺规范及性能(表 11-70 ~ 表 11-77,图 11-15 ~ 图 11-33)

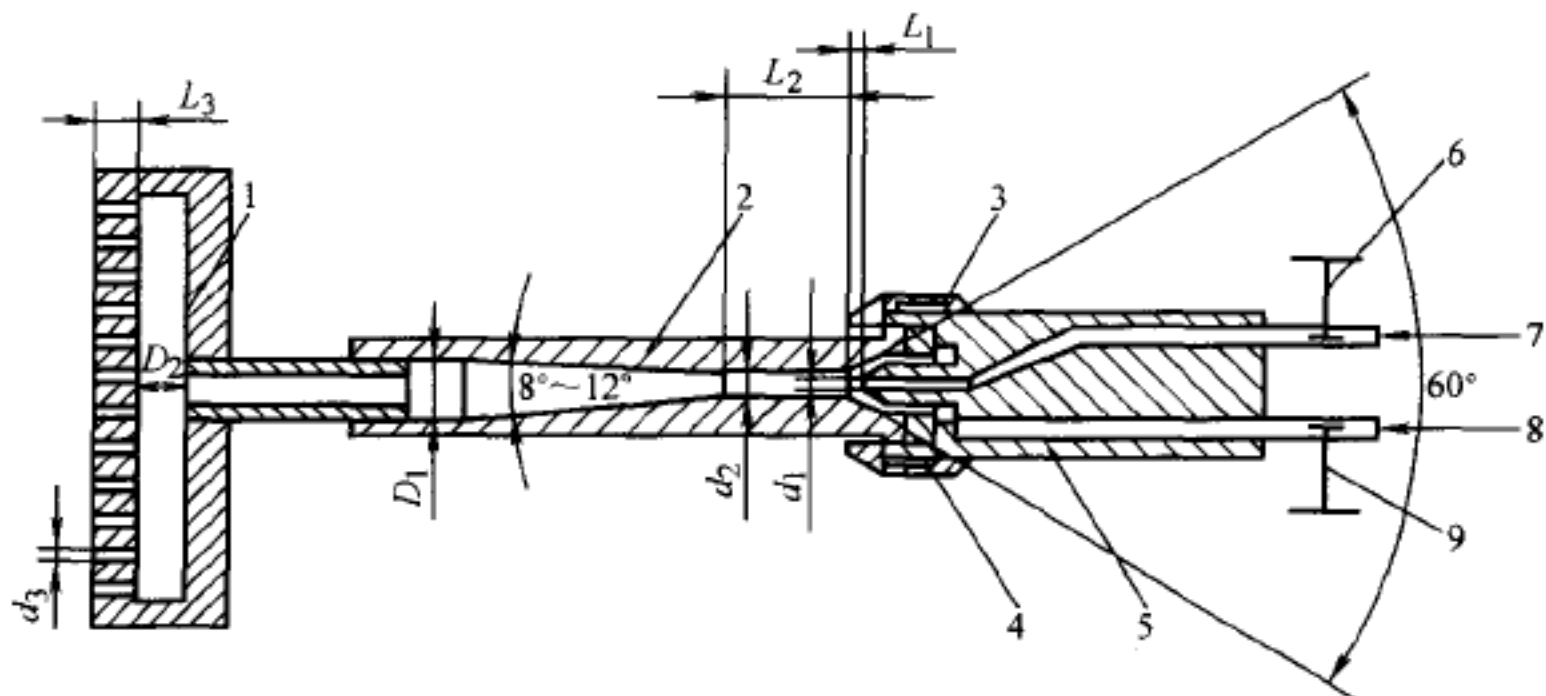


图 11-15 专用火焰加热器结构示意图

1—喷火嘴 2—混合室 3—喷嘴 4—螺帽 5—炬体 6—氧气调节阀
7—氧气导管 8—燃气导管 9—燃气调节阀

表 11-70 专用火焰加热器主要结构尺寸

主要尺寸	符 号	经验公式
喷嘴孔径	d_1	—
混合口孔径	d_2	—
喷火嘴孔径	d_3	—
混合室通路孔径	D_1	$(1.5 \sim 3) d_2$
储气室直径	D_2	$(1.5 \sim 2) d_3$
喷嘴与混合口间隙	L_1	$(1.2 \sim 1.5) d_1$
混合孔径长	L_2	$(6 \sim 12) d_2$
喷火嘴孔径深	L_3	$(5 \sim 10) d_3$

表 11-71 使用不同燃气的孔径规格

燃气名称	计 算 式	
	d_2	d_3
乙炔	$\approx (3 \sim 3.3) d_1$	$\approx 3 \times d_1$
氢	$\approx (3.2 \sim 3.5) d_1$	$\approx 3.5 \times d_1$
丙烷	$\approx (2.7 \sim 3) d_1$	$\approx 3.2 \times d_1$
天然气	$\approx (2.9 \sim 3.2) d_1$	$\approx 3.1 \times d_1$
城市煤气	$\approx (4.2 \sim 4.5) d_1$	$\approx 4.5 \times d_1$
焦炉煤气	$\approx (4 \sim 4.5) d_1$	$\approx 6 \times d_1$
煤油	$\approx (2.9 \sim 3.2) d_1$	$\approx 3.8 \times d_1$

表 11-72 火孔和水孔的行间距离关系

钢 号	水孔与火孔的行间距离/mm
35、40、45	10
35Cr、40Cr、ZG40Mn	15
55、50Mn、ZG340—570	20
35CrMnSi、40CrMnMo	25

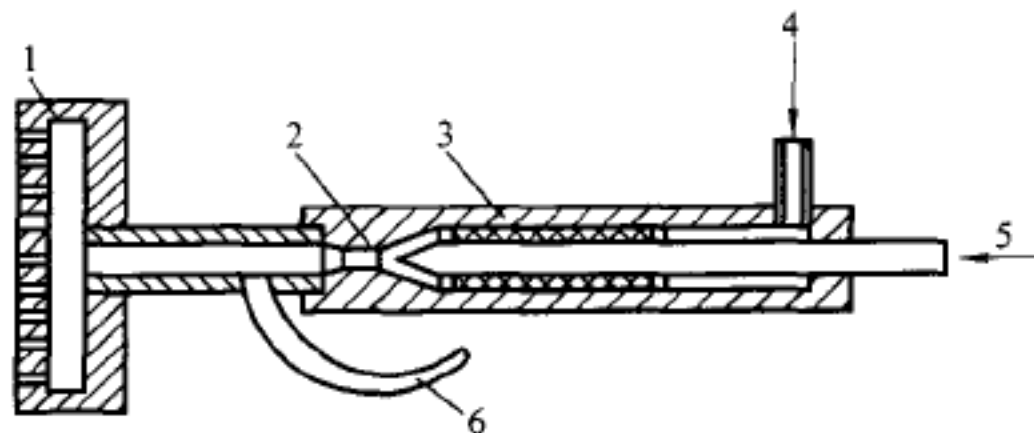


图 11-16 煤油火焰式加热蒸发用火焰淬火器
1—喷火嘴 2—混合室 3—石棉垫料蒸发室
4—气化煤油进口 5—氧气进口
6—火焰式蒸发嘴

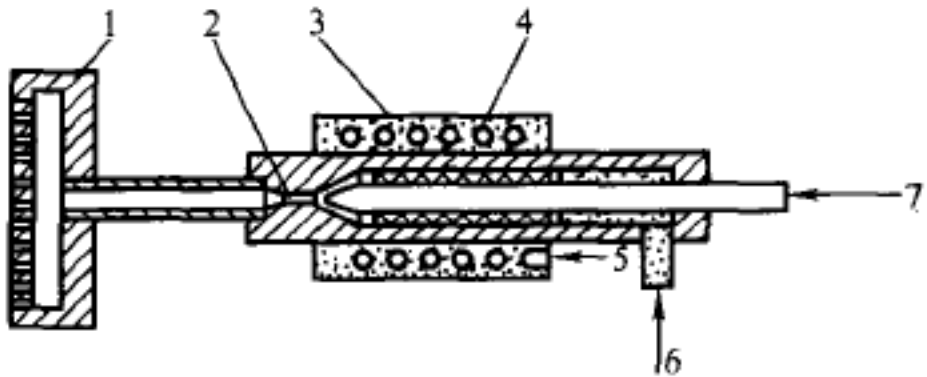


图 11-17 煤油电热式加热蒸发用火焰淬火器
1—喷火嘴 2—混合室 3—电热式蒸发器
4—石棉垫料蒸发室 5—电源进口
6—气化煤油进口 7—氧气进口

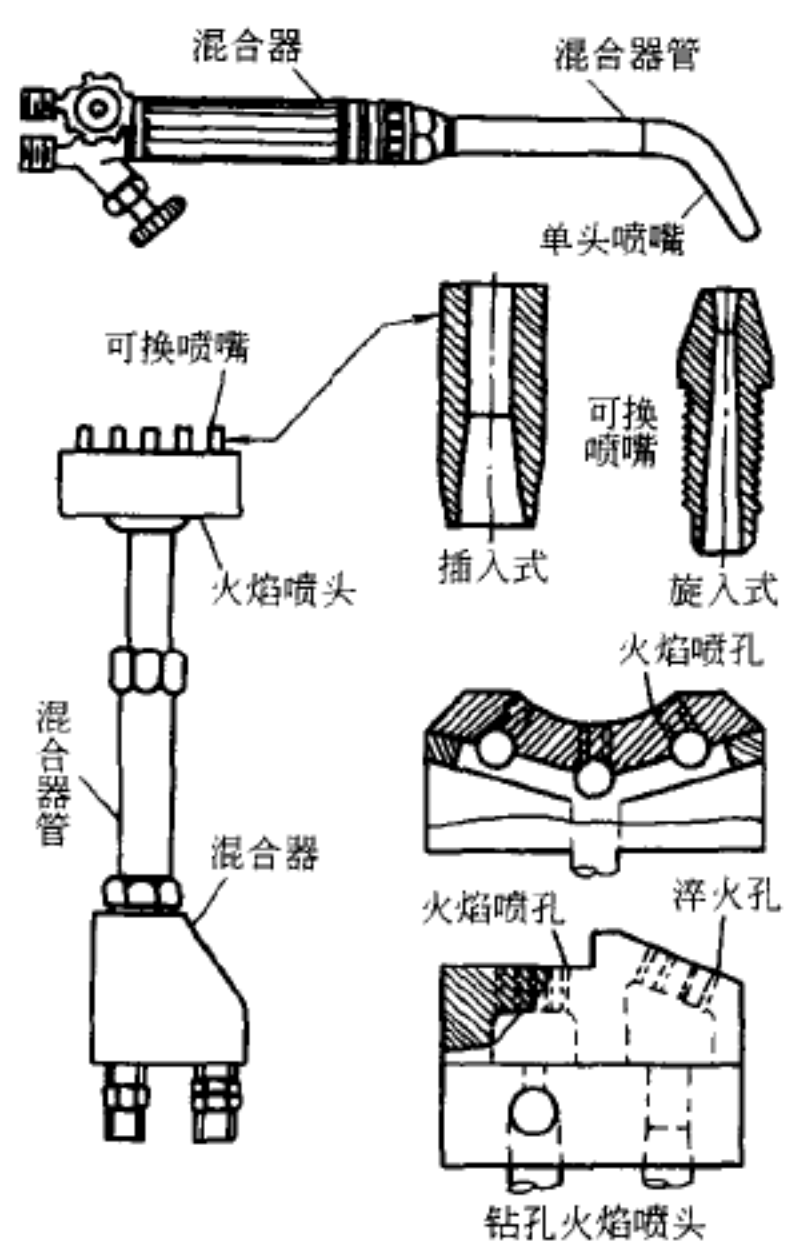


图 11-18 几种常用火焰喷头构造示意图

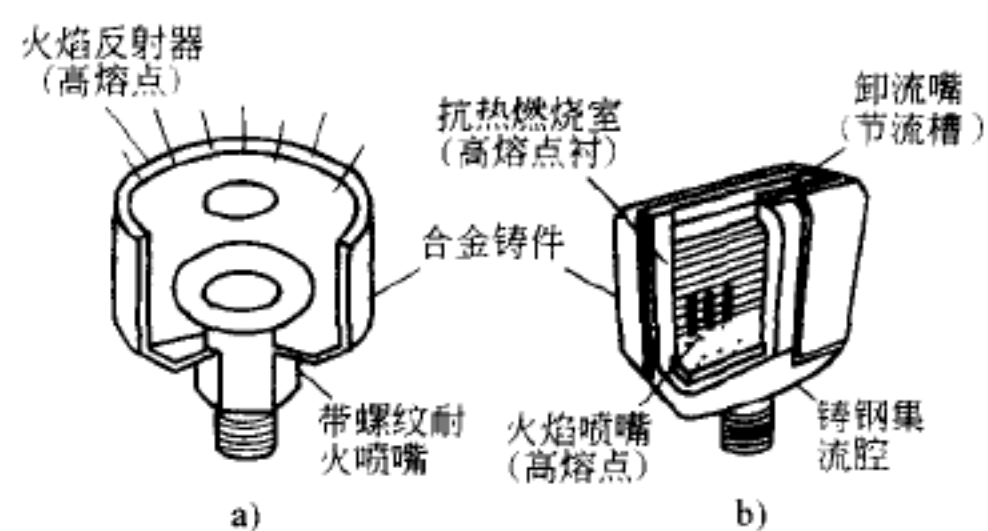
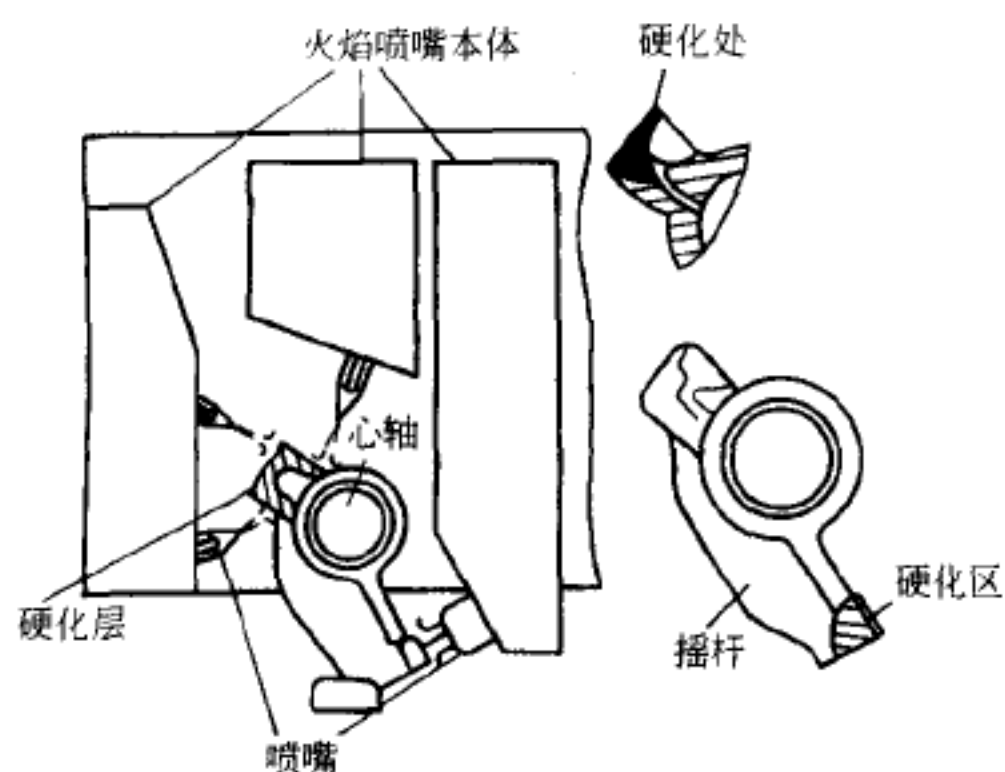
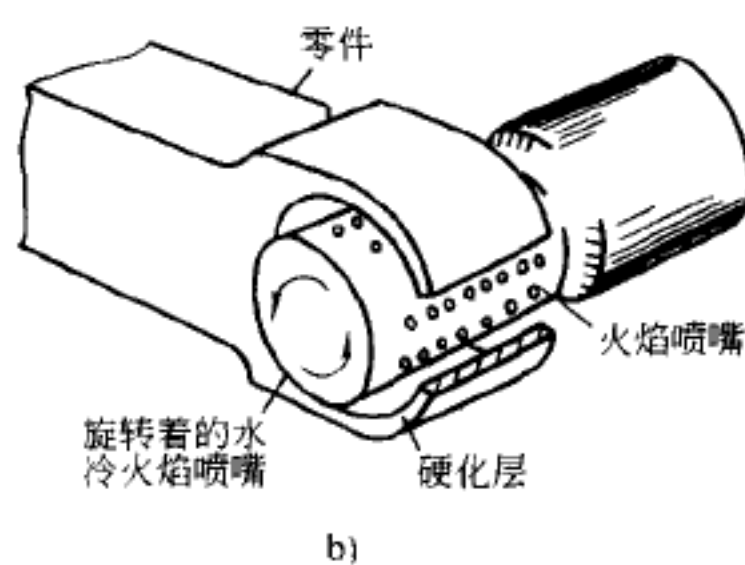
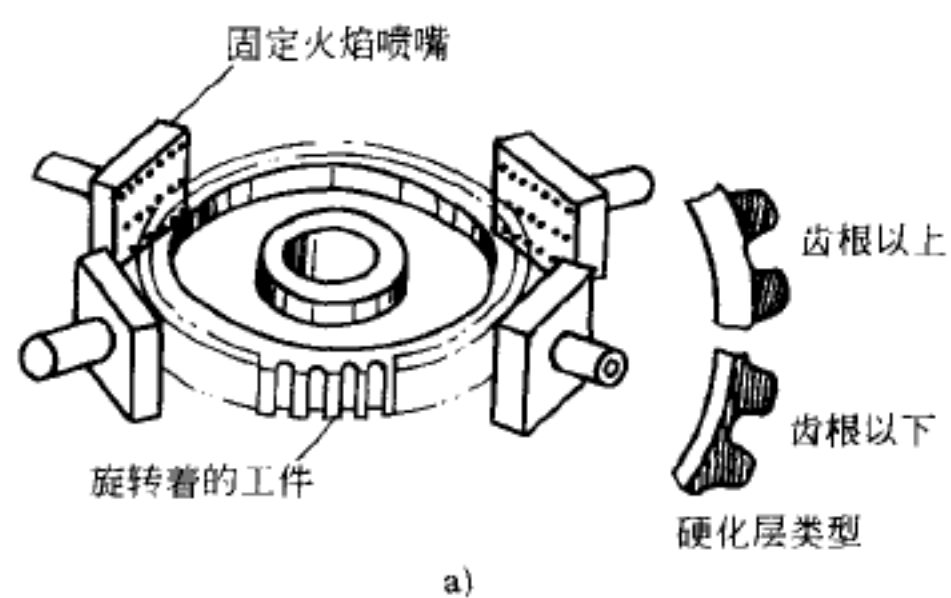
图 11-19 典型的用空气-燃烧气燃烧的烧嘴
a) 辐射型 b) 高速对流型(不用水冷)

图 11-20 固定法火焰淬火(气门摇臂)

图 11-21 旋转法火焰淬火
a) 小齿轮 b) 摇臂内孔

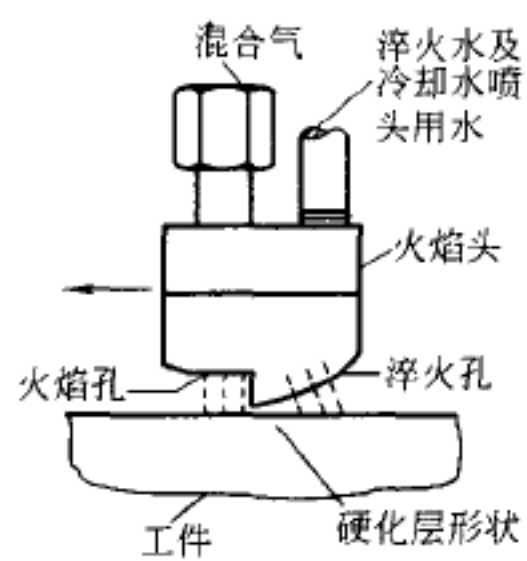


图 11-22 连续式火焰淬火

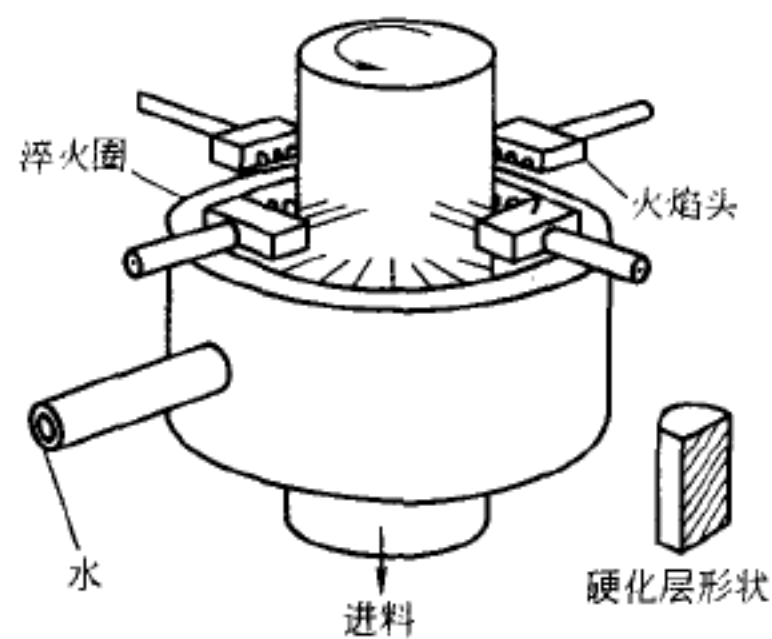


图 11-23 连续-旋转联合式火焰淬火

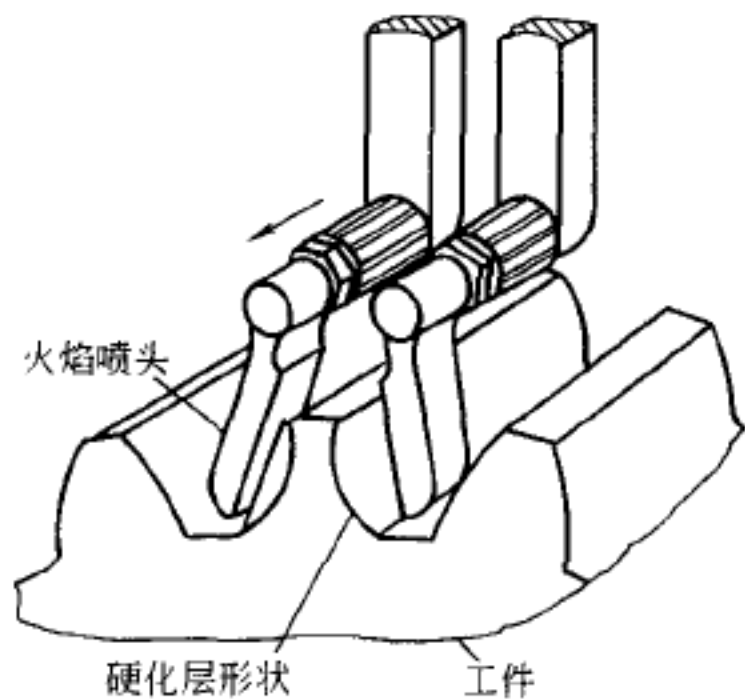


图 11-24 加热大型齿轮及链轮轮齿用特殊火焰喷头构造示意图

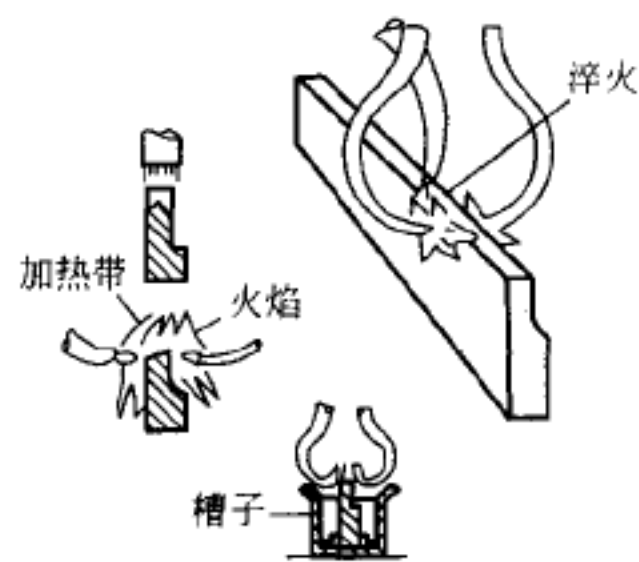


图 11-25 长刀片火焰淬火

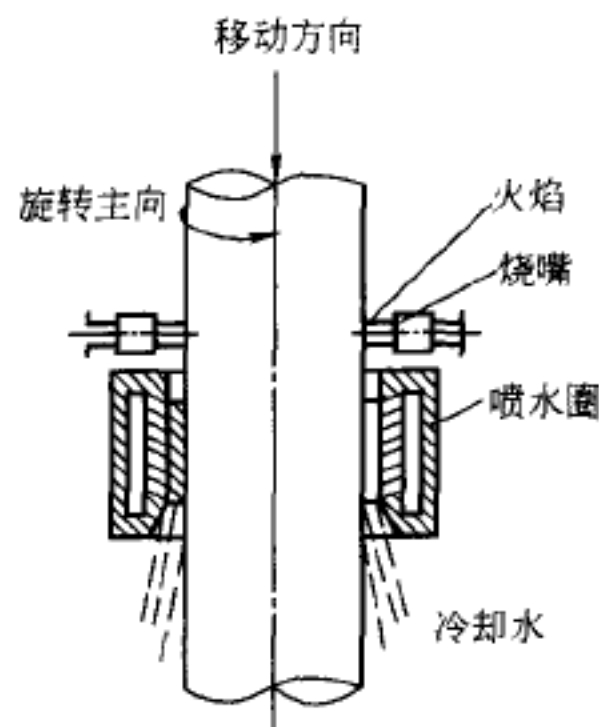


图 11-26 轴的旋转推进法火焰淬火

表 11-73 各种钢号(铸铁)的加热温度

钢 号 及 铸 铁	加 热 温 度/℃
35、ZG270—500、40	900 ~ 1020
45、ZG310—570、50、ZG340—570	880 ~ 1000
50Mn、65Mn	860 ~ 980
40Cr、35CrMo	900 ~ 1020
42CrMo、40CrMnMo、35CrMnSi	900 ~ 1020
T8A、T10A	860 ~ 980
9SiCr、GCr15、9Cr	900 ~ 1020
2Cr13、3Cr13、4Cr13	1100 ~ 1200
灰铸铁、球墨铸铁	900 ~ 1000

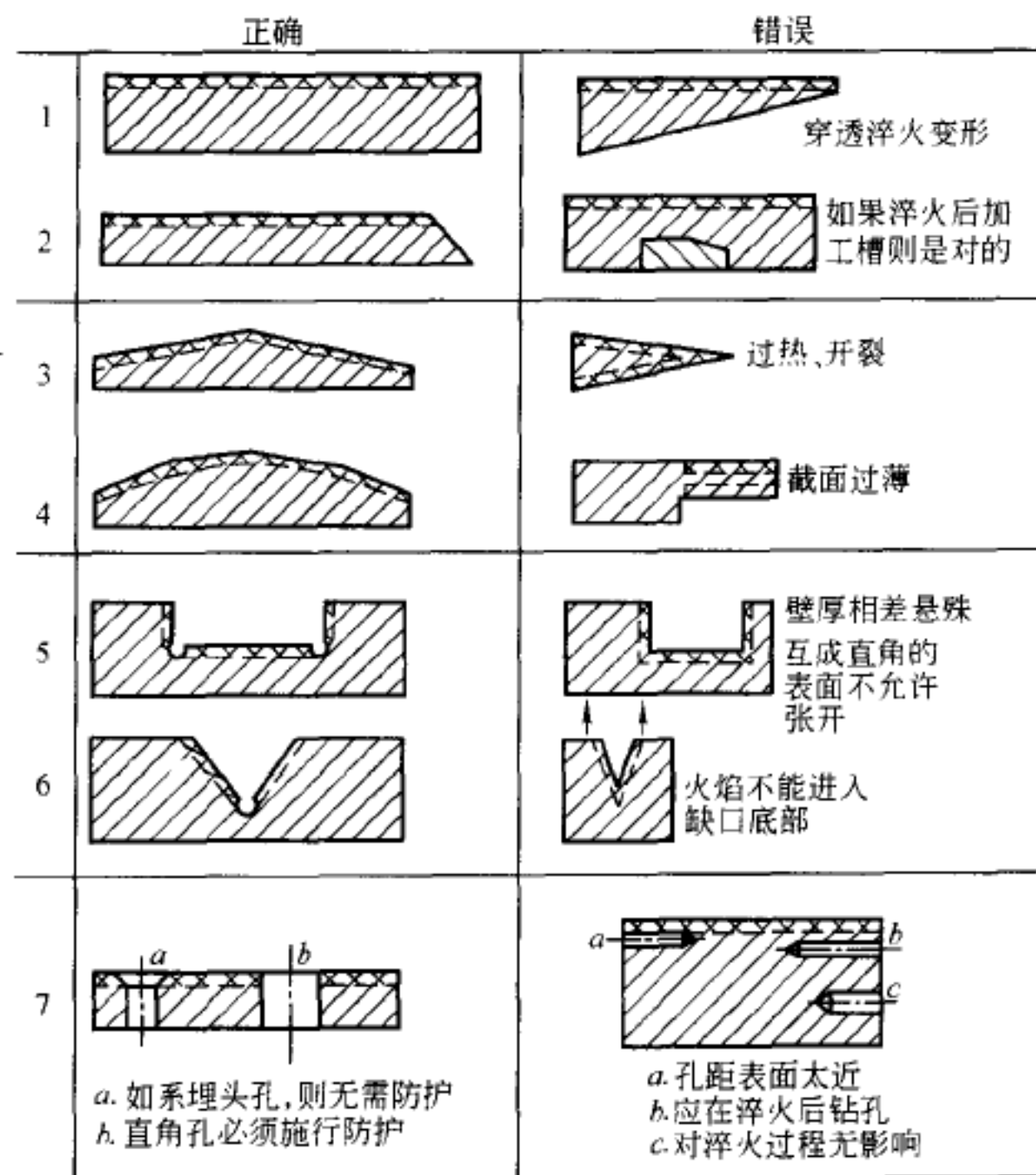


图 11-27 工件表面淬硬层的正误设计

表 11-74 用于火焰淬火的燃料气

气 体	加 热 值 /MJ·m ⁻³	火 焰 用 氧 /l·℃	温 度 用 空 气 /℃	氧 与 燃 料 气 常 用 比 率	氧 与 燃 料 气 混 合 气 加 热 值 ^① /MJ·m ⁻³	正 常 燃 烧 速 率 /mm·s ⁻¹	燃 烧 强 度 /mm·MJ· (s·m ³) ⁻¹	空 气 与 燃 料 气 常 用 比 率
乙 炔	53.4	3105	2325	1.0	26.7	535	14284	—
城 市 煤 气	11.2 ~ 33.5	2540	1985	②	②	②	②	②
天 然 气 (甲 烷)	37.3	2705	1875	1.75	13.6	280	3808	9.0
丙 烷	93.9	2635	1925	4.0	18.8	305	5734	25.0

① 氧-燃料气混合气的热值乘以正常燃烧速率的乘积。

② 随加热值和成分而异。

表 11-75 烧嘴移动速度, 气体消耗量与硬化层深度

硬化层深度 /mm	烧嘴移动速度 /mm·s ⁻¹	C ₂ H ₂ 消耗量 /cm ³ ·cm ⁻²	O ₂ 消耗量 /cm ³ ·cm ⁻²
8	0.8	3300	3600
6	1.25	3200	3350
5	1.67	1650	1760
3	2.1	1300	1400
1.5	2.5	1060	1180

表 11-76 钢与铸铁经火焰淬火后的特性 (AISI)

材 料	受冷却剂影响的典型硬度 HRC		
	空气 ^①	油 ^②	水 ^③
普通碳钢			
1025 ~ 1035	—	—	33 ~ 50
1040 ~ 1050	—	52 ~ 58	55 ~ 60
1055 ~ 1075	50 ~ 60	58 ~ 62	60 ~ 63
1080 ~ 1095	55 ~ 62	58 ~ 62	62 ~ 65
1125 ~ 1137	—	—	45 ~ 55
1138 ~ 1144	45 ~ 55	52 ~ 57 ^③	55 ~ 62
1146 ~ 1151	50 ~ 55	55 ~ 60	58 ~ 64
普通渗碳碳钢			
1010 ~ 1020	50 ~ 60	58 ~ 62	62 ~ 65
1108 ~ 1120	50 ~ 60	60 ~ 63	62 ~ 65
合金钢			
1340 ~ 1345	45 ~ 55	52 ~ 57 ^③	55 ~ 62
3140 ~ 3145	50 ~ 60	55 ~ 60	60 ~ 64
3350	55 ~ 60	58 ~ 62	63 ~ 65
4063	55 ~ 60	61 ~ 63	63 ~ 65
4130 ~ 4135	—	50 ~ 55	55 ~ 60
4140 ~ 4145	52 ~ 56	52 ~ 56	55 ~ 60
4147 ~ 4150	58 ~ 62	58 ~ 62	62 ~ 65
4337 ~ 4340	53 ~ 57	53 ~ 57	60 ~ 63
4347	56 ~ 60	56 ~ 60	62 ~ 65
4640	52 ~ 56	52 ~ 56	60 ~ 63
52100	55 ~ 60	55 ~ 60	62 ~ 64
6150	—	52 ~ 60	55 ~ 60
8630 ~ 8640	48 ~ 53	52 ~ 57	58 ~ 62
8642 ~ 8660	55 ~ 63	55 ~ 63	62 ~ 64

(续)

材 料	受冷却剂影响的典型硬度 HRC		
	空气 ^①	油 ^②	水 ^③
渗碳合金钢 ^④			
3310	55 ~ 60	58 ~ 62	63 ~ 65
4615 ~ 4620	58 ~ 62	62 ~ 65	64 ~ 66
8615 ~ 8620	—	58 ~ 62	62 ~ 65
马氏体不锈钢			
410 和 416	41 ~ 44	41 ~ 44	—
414 和 431	42 ~ 47	42 ~ 47	—
420	49 ~ 56	49 ~ 56	—
440(典型的)	55 ~ 59	55 ~ 59	—
铸铁 (ASTM 级)			
30	—	43 ~ 48	43 ~ 48
40	—	48 ~ 52	48 ~ 52
45010	—	35 ~ 43	35 ~ 45
50007, 53004, 60003	—	52 ~ 56	55 ~ 60
80002	52 ~ 56	56 ~ 59	56 ~ 61
60-45-15	—	—	35 ~ 45
80-60-08	—	52 ~ 56	55 ~ 60

① 为了获得表中的硬度值,在加热过程中,那些未直接加热区域必须保持相对冷态。

② 薄的部位在淬油或淬水时易于开裂。

③ 经旋转和旋转-连续复合加热,材料的硬度比经连续式、定点式加热材料的硬度稍低。

④ w_C 0.90% ~ 1.10% 渗层表面的硬度值。

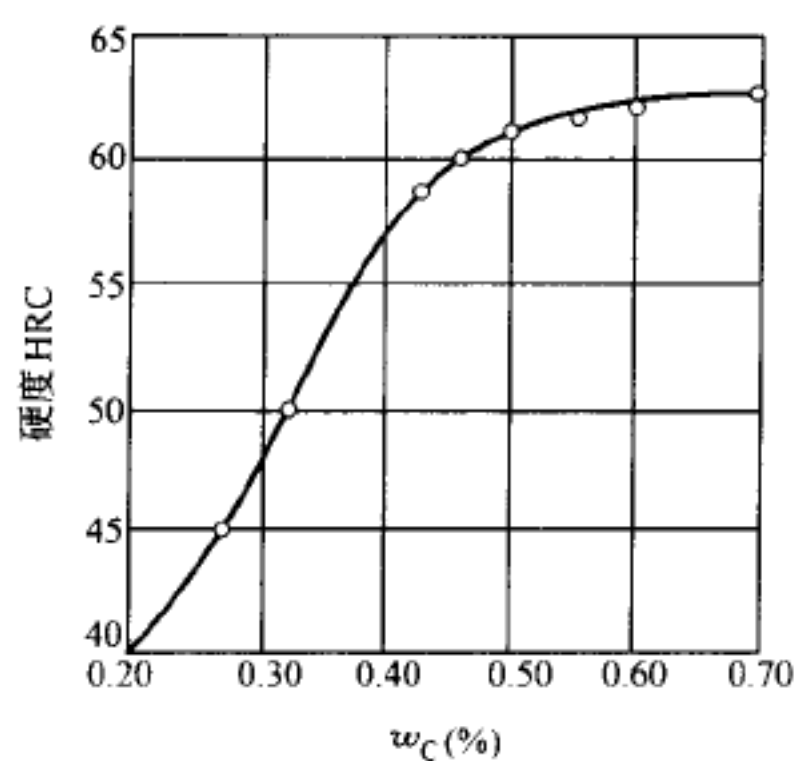


图 11-28 火焰淬火或感应加热并水淬所获得的最小表面硬度与碳含量的关系

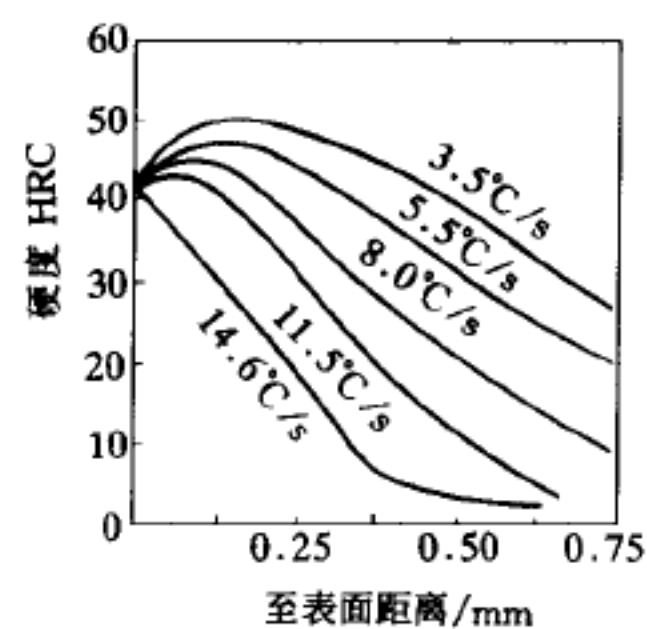


图 11-29 加热速度与硬化层的关系

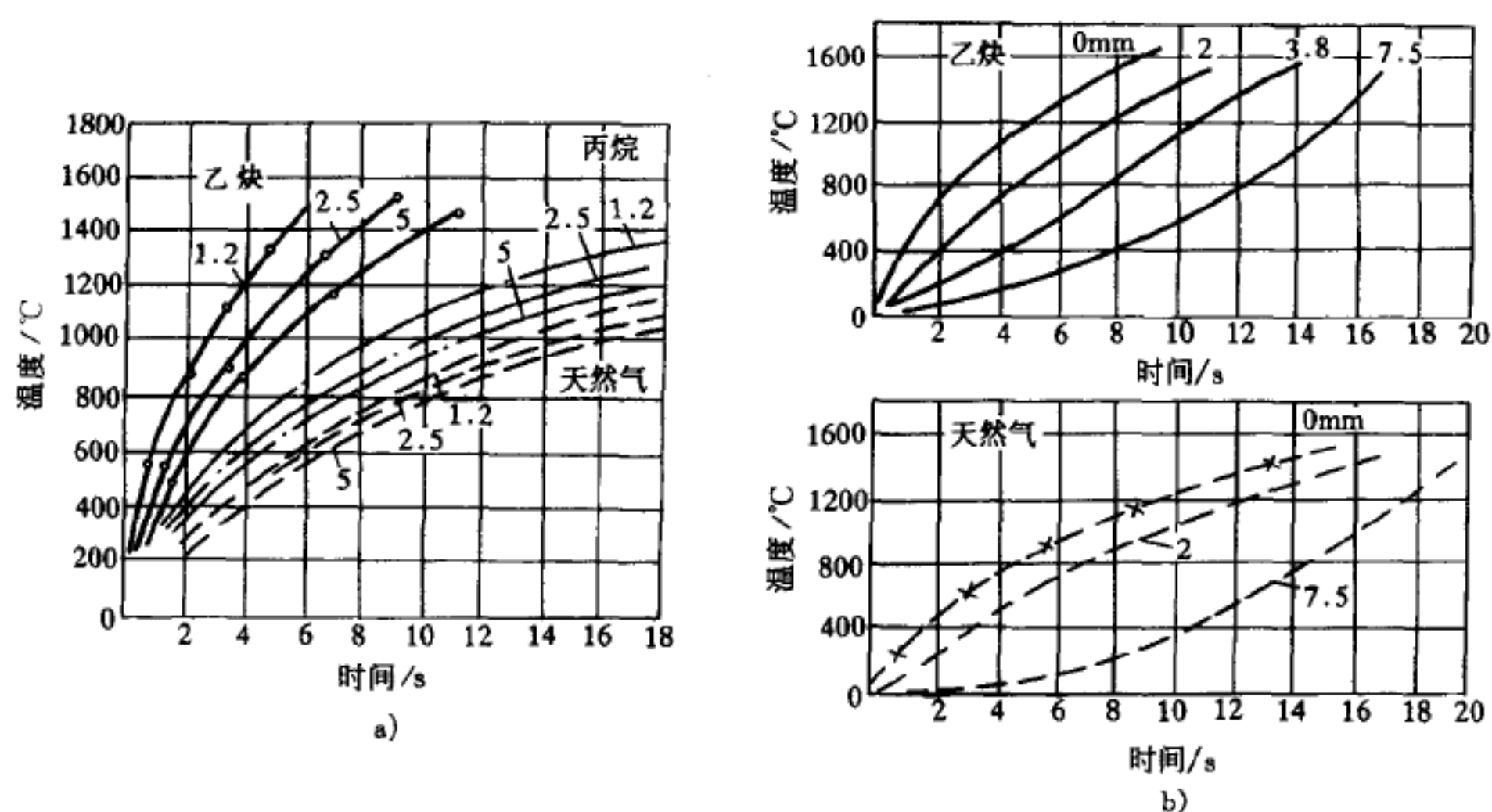


图 11-30 不同加热方式加热时表层温度与加热时间的关系

〔图中数字为距表面的距离(mm)〕

a) 固定法加热(摇臂杆) b) 旋转法加热(圆柱体)

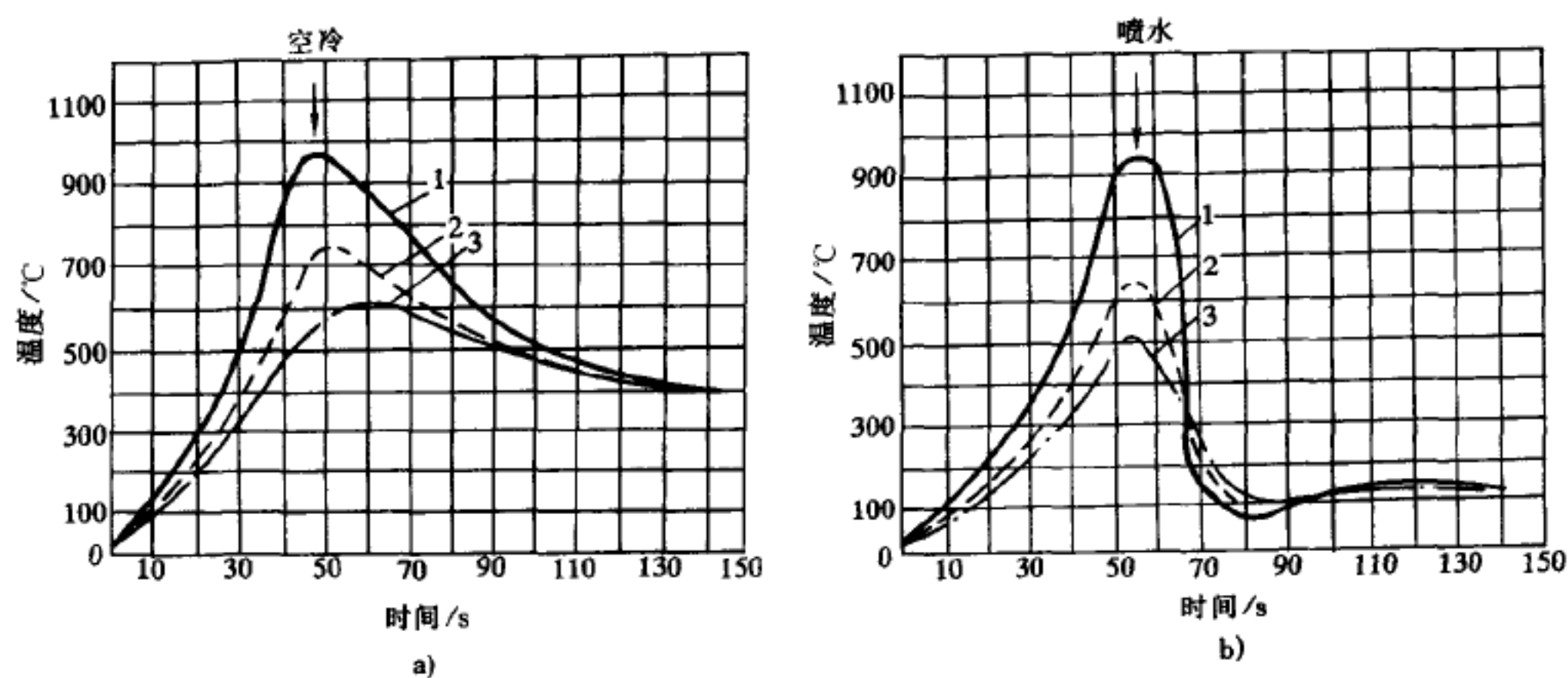
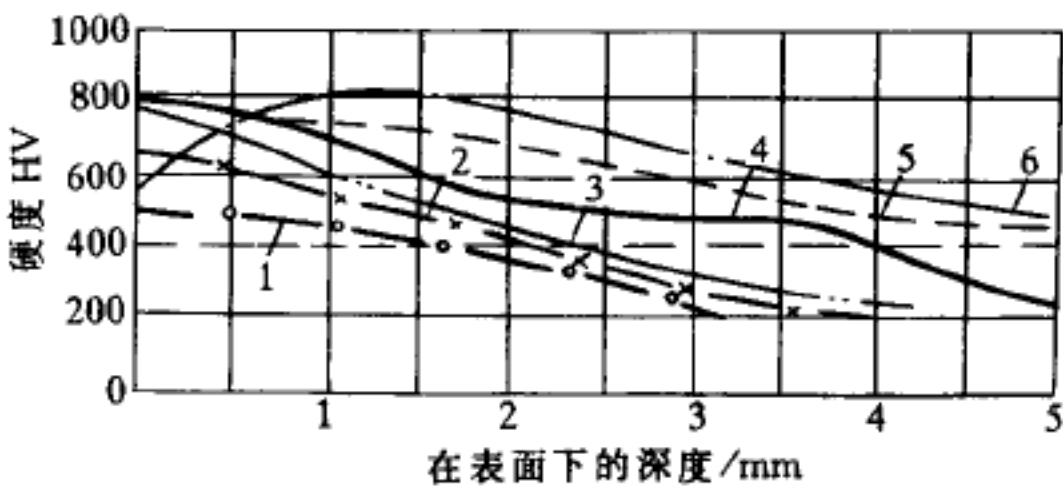


图 11-31 实际加热时间与工件表面温度分布的关系

试样尺寸 25mm × 50mm × 100mm 烧嘴移动速度 75mm/min 烧嘴与工件间距 8mm

a) 空冷时 b) 水冷时

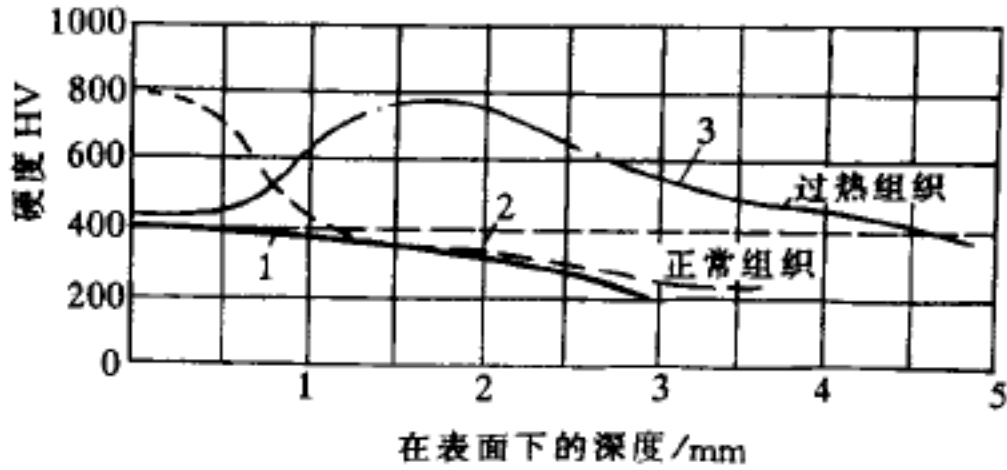
1—表面温度 2—表面下 2mm 处温度 3—表面下 10mm 处温度



图中曲线号	1	2	3	4	5	6
在表面 10mm 下温度/℃	630	650	700	750	800	850
烧嘴与工件距离/mm	12	10	8	12	10	8
移动速度/mm·min ⁻¹	75	75	75	50	50	50

图 11-32 工件表面硬度与烧嘴距离及移动速度关系

试样 25mm×75mm×100mm, 空冷



图中曲线号	1	2	3
烧嘴距离/mm	12	12	12
移动速度/mm·min ⁻¹	100	75	60

图 11-33 烧嘴距离及移动速度与表面硬度的关系

试样 25mm×75mm×100mm, 空冷

表 11-77 火焰加热工具使用故障及处理方法

故障及原因	处理方法
混合气燃烧速度高, 气体流速低, 气体供应量不足, 致使在工具外部燃烧的火焰导向工具内部回燃形成回火	按燃气与不同氧气的混合比例, 选择合理的混合室, 喷嘴及喷火嘴 调整供气压力, 保持流速, 保证流量供给
喷火嘴热量过高, 使工具内部混合气体受热膨胀而产生附加阻力, 妨碍供气流动, 造成爆鸣及回火	降低喷火嘴温度 合理安置设有冷却水装置的喷水嘴
喷火嘴出口孔径与深度的要求制作不合理, 一般是出口孔径过大, 孔深度过短及嘴内储气室过宽, 使外界多量空气积聚于火嘴气室内, 点火时, 空气与燃气达到最易爆炸范围, 立即发生回火	按照燃气性质要求, 制作喷火嘴点火时放泄适量余气, 然后再点火。多焰孔径建议选用: 乙炔氧 $\phi 0.5 \sim \phi 0.8\text{mm}$; 丙烷氧 $\phi 0.8 \sim \phi 1.2\text{mm}$; 天然气氧 $\phi 1.5 \sim \phi 2\text{mm}$
喷火嘴某部钎焊有微漏, 或材料有砂眼, 气孔等情况, 在点燃火焰后, 空气被吸入火嘴内, 当空气混入燃气达到一定比例量时, 即产生爆鸣及回火	保证钎焊部的焊接质量 喷嘴材料应采用挤压铜材, 不用铸件 新制的喷火嘴, 用气压试验气密性
火焰加热工具的混合室、喷嘴、喷火嘴、调节阀等零部件联接处气密性不好, 使应隔离的各毗邻通路发生连通, 造成气体流窜影响原定的气体流程而回火	检查各部件气密部位配合面的精度, 如有不精确或损坏的应予调换, 在总装时, 各螺纹紧固件必须拧紧, 不应漏气
火焰加热工具的各零部件处沾有油脂, 油脂与氧在一定压力下, 产生剧烈的氧化反应, 发生自燃或回火, 有烧损氧气调节阀及氧气胶管的危险	清除火焰加热工具沾染的油脂 各部件严禁与油脂接触, 对必须涂润滑脂的部件, 如调节阀的气密垫料部位, 应采用抗氧化性能好的硅脂与石墨浸涂的石棉垫料, 或含有石墨的聚四氟乙烯作为垫料

(续)

故障及原因	处理方法
氧气胶管老化和氧气压力过高,对抗氧化性能较差的胶管,极易产生回火或自然而烧损胶管	氧气工作压力应在 294 ~ 490kPa 的范围,最高不超过 784kPa 陈旧老化的胶管,应及时调换
火焰加热工具使用的时期较长,以及日常回火等因素,形成在氧气调节阀、喷火嘴、燃气与混合口通路等部位聚积炭黑污垢,影响气流,当火焰随聚积的点燃炭黑呈暗红状态向工具内部蔓延时,即形成回火	定期清除积聚炭黑污垢,可用酸洗加热烧除(以约 500℃ 的火焰烧尽炭灰)及人造爆鸣冲除(关小氧及燃气,产生人造回火)等方法
喷火嘴与淬火工件过近,或有碰撞情况发生爆鸣及回火	调整喷火嘴与工件的距离
冷却水孔与喷水嘴火孔的间距过近,当淬火时受水蒸气的干扰影响,形成熄火或回火	在火孔与水孔之间应加挡板 选定适宜的冷却水出口斜度
喷火嘴发生回火时,产生严重灭火状况,喷火嘴经连续数次关闭后,在再开启调节阀门时,仍有燃烧的明光自喷火嘴内外冲出	燃气调节阀与氧气调节阀关闭气密性不良,应予检修或调换 喷火嘴制作质量不良和火孔孔径扩大,必须更换火嘴

11.3 激光电子束表面相变硬化工艺规范及性能(表 11-78 ~ 表 11-92 和图 11-34 ~ 图 11-42)

表 11-78 45 钢板激光淬火的硬化层深度

速度/mm·min ⁻¹	功率/kW	硬化层深度/mm	速度/mm·min ⁻¹	功率/kW	硬化层深度/mm
510	2500	0.52	760	3000	0.24
510	3000	1.02	760	3600	0.66
510	3600	1.37	760	4150	1.24

表 11-79 42CrMo 钢激光表面淬火效果

黑化处理	淬火层深度/mm	淬火带宽度/mm	硬度/HV	淬火组织
氧化	~ 0.25	1.3	842	隐针细针马氏体
磷化	~ 0.35	1.53	642	隐针细针马氏体
涂磷酸锰	~ 0.35	1.64	642	隐针细针马氏体

注:激光器工作电流 25 ~ 30mA;电压 110V;扫描速度 6mm/s;试样表面离焦距 + 15mm。

表 11-80 激光淬火和普通热处理试样的耐磨性

钢 材	磨 损 体 积/mm ³			钢 材	磨 损 体 积/mm ³		
	激光淬火	淬火 + 低温回火	淬火 + 高温回火		激光淬火	淬火 + 低温回火	淬火 + 高温回火
45	0.105	0.161	2.232	18Cr2Ni4WA	0.386	0.837	2.232
T12	0.082	0.131	—	40CrNiMoA	0.064	0.082	1.047

表 11-81 SK-5 钢激光相变硬化与高频感应加热淬火表面耐磨性对比

处理方法	材 料	硬度 HRC	淬火深度/mm	载荷/N	擦伤	磨耗损失
激光硬化	SK-5	64 ~ 67	0.7 ~ 0.9	989.8	未出现	0.5
感应淬火	SK-5	60 ~ 63	2 ~ 3	989.8	出现	1

表 11-82 几种铸铁表面的激光熔凝层的硬度

材料	原来硬度 HV	激光熔凝层硬度 HV
灰铸铁	250	800 ~ 950
球墨铸铁	180	400 ~ 950
白口铸铁	670	800
硅铸铁	240	1000
含镍白口铸铁		550 ~ 610
高镍耐热铸铁	160	360 ~ 450
高铬铸铁	230	330 ~ 400

表 11-83 各种零件激光处理试验试用举例

编 号	零件名称	材料及状态	激光处理工艺	优点或效果
1	梳棉用针布	60 钢、65Mn 钢有的还含 Cr, 齿高 1mm, 齿根宽 0.5mm, 齿距 0.75mm, 齿尖厚度 0.13mm, 下部有高 1.3mm、厚 0.8mm 长带托着齿, 长度可达数千米	30W 激光器, 扫描速度 12 ~ 21.4m/min (要求 12m/min 以上), 仅要求齿硬, 托必须软处理后齿尖达 800 ~ 950HV, 组织马氏体	比原用火焰法质量及稳定性均高, 耐用性好。火焰法对短齿针布无法处理, 而激光法能简易解决
2	油压继电器内杠杆上的小窝	40Cr 钢要求小窝底硬度 42HRC 以上	125W 激光, 光斑约 $\phi 0.7\text{mm}$ 静止照射 10s	原工艺为火焰淬火, 加热面积大、变形大, 工艺不易掌握, 处理后, 组织为马氏体, 硬度 650 ~ 700HV (相当于 57HRC), 基体 280HV (相当于 28HRC), 硬化层不论在位置、尺寸及硬度方面均符合要求
3	大型内燃发动机阀杆锁夹	42CrMo 钢一般在调质后精加工状态下使用	用 152W 激光束纵向处理 4 条, 深 0.2mm, 宽 1.2mm	硬化条硬度 700 ~ 780HV, 耐用性大为提高, 未处理的运行 $12.5 \times 10^4 \text{ km}$ (约 2000h) 后, 内部凸出的棱边均已磨平, 而经激光处理的很少变化
4	汽车曲轴	铸造球墨铸铁	在圆弧处照射	硬度提高到 55 ~ 62HRC, 耐磨性和疲劳强度均能提高
5	凸轮轴	铸铁	用 10kW 激光器, 层深 1mm, 每小时处理 70 根, 不需后加工	变形 < 0.13mm, 硬度 60HRC, 硬化层均匀, 耐磨性有很大提高
6	花键轴	钢	10kW, 12.7mm/s	齿面及齿根硬化均匀
7	阀杆导孔	灰铸铁	400W 激光处理较小内孔	得到硬度高的马氏体, 提高耐磨性, 变形很小
8	活塞环(各种尺寸)	铸铁或低合金铸铁	在环面上用激光相变硬化或熔化-凝固处理, 处理后仅磨光即可	汽车活塞环耐磨性提高一倍, 不拉缸, 同时缸壁磨损量下降 35%, 现已有激光自动表面强化机在使用中, 蒸汽机车汽室活塞环耐磨性提高 2 ~ 3 倍, 同时汽室套偏磨量减小到 1/2 ~ 1/3

(续)

编 号	零件名称	材料及状态	激光处理工艺	优点或效果
9	活塞环槽侧面	灰铸铁或球墨铸铁	3kW, 50s	此处其他方法难以进行, 用激光可以很容易地硬化, 提高耐用性
10	各种小型气缸套	灰铸铁或合金铸铁	激光相变硬化或带微熔, 在上止点下一定宽度进行螺旋条状扫描	比用硼铸铁等成本低, 耐磨性比硼缸套提高 32% ~ 61%, 具有较大技术经济效益
11	精密仪器 V 形导轨	45 钢	激光相变硬化纵向数条	较原来渗碳工艺减少工序, 变形极小, 成品率提高
12	针织机针筒	45 钢	仅在针槽部位硬化数条环	因工件为大直径薄空筒, 整体淬火及渗碳极易变形, 废品率高, 如不硬化则极不耐用
13	大型内燃机弹性联接主片	50CrV	用激光相变硬化, 硬化层深 0.4 ~ 0.5mm, 隐针或细针状马氏体	硬化层深 0.4 ~ 0.5mm, 硬度 > 800HV, 变形很小, 仅 0.02mm。和 38CrMoAl 花链轴对磨, 用高频淬火时, 变形大, 热影响区大, 使弹性下降, 激光处理能局部硬化, 避免了这些缺点
14	各种瓦垄板用波纹辊	包括瓦垄或其他瓦垄板用钢制	例如纸板用为 1.2kW 激光器, 仅处理瓦垄的冠部	深度 1mm, 60 ~ 63HRC。辊长 3.05m, 辊重 1200kg。整体法和其他表面法处理均变形大, 并成本高。激光处理能大大降低成本
15	各种齿轮	各种钢	仅对齿面进行激光加热处理	耗能小、变形小, 硬化轮廓合理, 一般不需再磨削
16	石油井管内壁	钢制, 内壁受到钻杆的磨损	用激光在内壁处理成交叉螺纹	一般处理方法是不可可能的, 而激光能做到, 并且变形及弯曲均很小, 可以大大提高耐磨性, 延长使用寿命
17	舰艇用火箭发射安全凸轮	AISI4030 钢	在数控工作台上, 扫描 6mm 的条, 并互搭, 深 0.38 ~ 0.43mm 互搭区深 0.22 ~ 0.25mm	硬度 62HRC, 互搭区很狭, 51HRC, 变形很小 (< 0.03mm)。原来用碳氮共渗法, 24h, 并有环境污染问题。用激光法后耐磨性及耐蚀性均能满足要求, 且能降低成本
18	M-1 或 M60 战车零件 (T-142 端头联结器)	AISI4140	5000W 激光相变硬化每个零件仅用 60s	硬度 55HRC, 层深 < 5mm。由于激光可精密地并较深地使需要的局部硬化, 使得它在恶劣的使用条件下格外耐用

(续)

编 号	零件名称	材料及状态	激光处理工艺	优点或效果
19	电动打字机键杆托	钢制,需硬化部位宽 1mm、3mm	1.2kW 激光聚焦,光斑 $\varphi 3\text{mm}$ 。将许多个夹在一 起扫描处理	由于对处理部位要求严,变形 需小,要求 58HRC 等,一般方法 非常困难,激光则非常适合,能 很容易地解决
20	压缩机用螺旋塞	钢	用激光仅处理和套接触 的螺旋顶边	变形极小,不需后加工,可以 顶两个用
21	电推子齿板	$w_c 0.7\%$ 碳钢	用 500W 激光,遮住太 细的齿尖,扫描硬化	3s 一个,硬度达 60HRC,效率 高,变形小。而常用方法变形 大,齿尖脆化

表 11-84 几种激光热处理的工艺特点

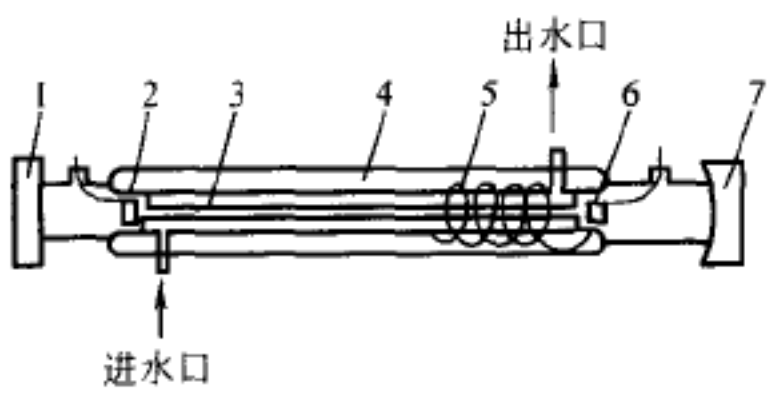
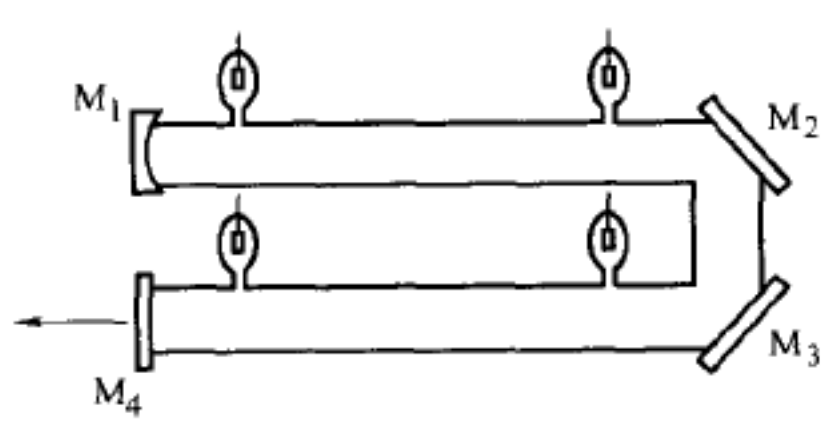
工艺特点	处理目的	措 施	功率密度 $/\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$	处理效果	应 用
表面相 变硬化	获得淬火组织	表面薄层加热至奥氏体 化	$10^3 \sim 10^5$	获得细针状马氏体组织	合金钢、铸铁
激光 非晶化	使工件表层结构变 为非晶态	同上,但需提高冷速(附 加冷却),采用脉冲激光加 热	$> 10^7$	表层为白亮的非晶态结 构,强度及塑性均提高,还 可获得某些特殊性能	高强度材料、超 导材料、磁性材 料、耐蚀材料
激光涂覆	工件表面覆盖一层 金属或碳化物	在保护气氛下使施加于 工件表面的金属或碳化物 粉末熔化	$10^5 \sim 10^7$	覆盖层与基体结合良 好,其中所含元素不会被 基体稀释,畸变小	碳钢、不锈钢、 球墨铸铁
激光 合金化 ^①	改变工件表层的化 学成分以获得特定性 能	通过电镀、溅射或放置 粉末、箔、丝等合金化材 料,在保护气氛下加热并 保温,使合金化材料与工 件表层熔融结合	$10^5 \sim 10^7$	合金化表层晶粒细小、 成分均匀	各种金属材料 均可应用
激光 冲击硬化	利用激光照射产生 的应力波使工件表层 加工硬化	使用脉冲激光并在工件 表面涂覆一层可透过激光 的物质(例如石英)	$1 - 2 \times 10^6$	提高疲劳强度及表面硬 度	齿轮、轴承等精 加工后的非平面 表面
激光上釉	改善铸件表层组织	表面薄层加热至熔点以 上	$10^5 \sim 10^7$	晶粒细化、成分均匀化, 疲劳强度、耐蚀性、耐磨性 均提高	耐酸铸造合金、 高速钢

① 为防止合金化层开裂,处理前应预热工件、处理后应退火。

表 11-85 不同黑化处理对 45 和 42CrMo 钢激光表面淬火效果的影响

钢号	黑化处理	淬硬层深度 /mm	淬硬带宽度 /mm	硬度 HV	淬硬层组织
45	氧化	0.19 ~ 0.20	1.08 ~ 1.10	542	细针马氏体
	磷化	0.22 ~ 0.27	1.10 ~ 1.23	542	细针马氏体
	涂磷酸盐	0.25 ~ 0.31	1.18 ~ 1.35	585	细针马氏体
42CrMo	氧化	~ 0.25	1.30	842	隐针马氏体
	磷化	~ 0.35	1.53	642	隐针马氏体
	涂磷酸盐	~ 0.35	1.64	642	隐针马氏体

表 11-86 热处理用 CO₂ 激光器的种类

种类	结构示意图	特 点
直管式	 <p>1—平面反射镜 2—阴极 3—水冷管 4—储气管 5—回气管 6—阳极 7—凹面镜</p>	<p>输出功率与放电管长度成线性关系,平均每米长度可获得连续输出功率 40 ~ 50W(气体配比及气压均为最佳)</p> <p>工作寿命有限,影响因素主要是电极溅射及 CO₂ 分子在工作过程中由于电子的非弹性碰撞而不断分解。放电管采用硬质玻璃或石英玻璃管制成,易碎。输出功率高时,外形长度较长</p>
封离型 CO ₂ 激光器	 <p>M₁—凹面镜 M₂、M₃—全反射镜 M₄—反射镜(有一定透过率)(未画水冷套)</p>	<p>减少了输出功率较高的直管式 CO₂ 激光器的外形长度,但增加了激光输出的反射镜损失</p>

(续)

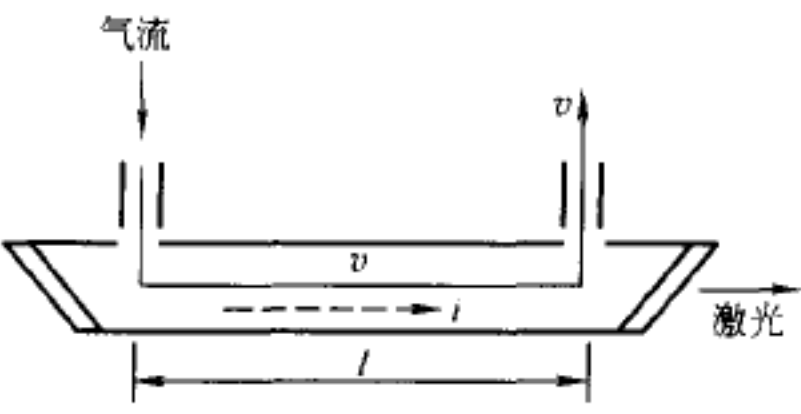
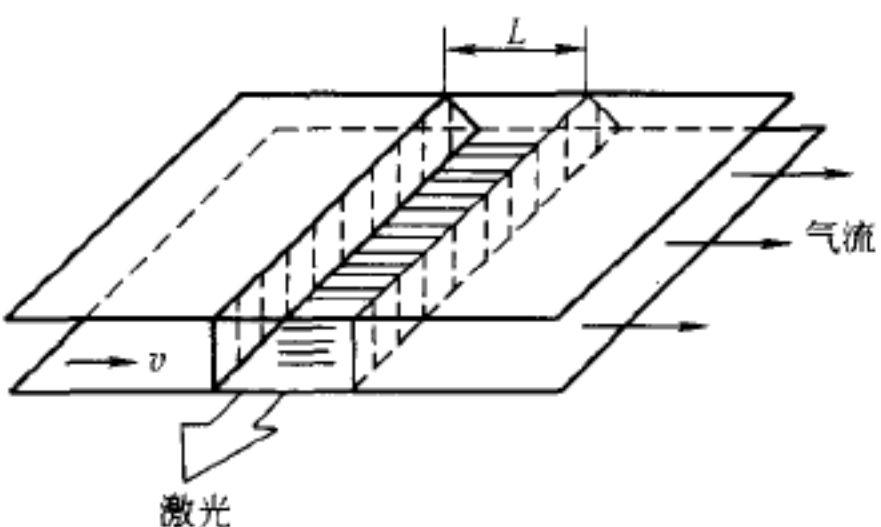
种类	结构示意图	特点
气体流动 CO ₂ 激光器	 <p>l—放电长度 v—流速</p>	工作气体流动时冷却效率最好,每米连续输出功率可达上万瓦,但装置比较复杂,气体消耗量大,气流,电流和光轴三者同向。为增加冷却效果,应有较高流速,因而气体分布梯度很高,需要庞大的抽气设备
	 <p>l—放电长度 v—流速</p>	激光输出垂直于气体方向,由于气体流经的放电长度较短,流速不必很高,也可适当降低放电电压

表 11-87 热处理用激光器的特性

激光器	激光材料	振荡波长 μm	最大输出	发散角 弧度	效率 (%)
固体激光器	红宝石($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$)	0.6943	脉冲大于 1f	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	≈ 1
	钕玻璃	1.06			≈ 4
	YAG: Nd($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$)	1.06	连续振荡大于 200W		≈ 3
气体激光器	二氧化碳 $\text{CO}_2:\text{N}_2,\text{He}$	1.06	连续振荡大于 1000W		≈ 10

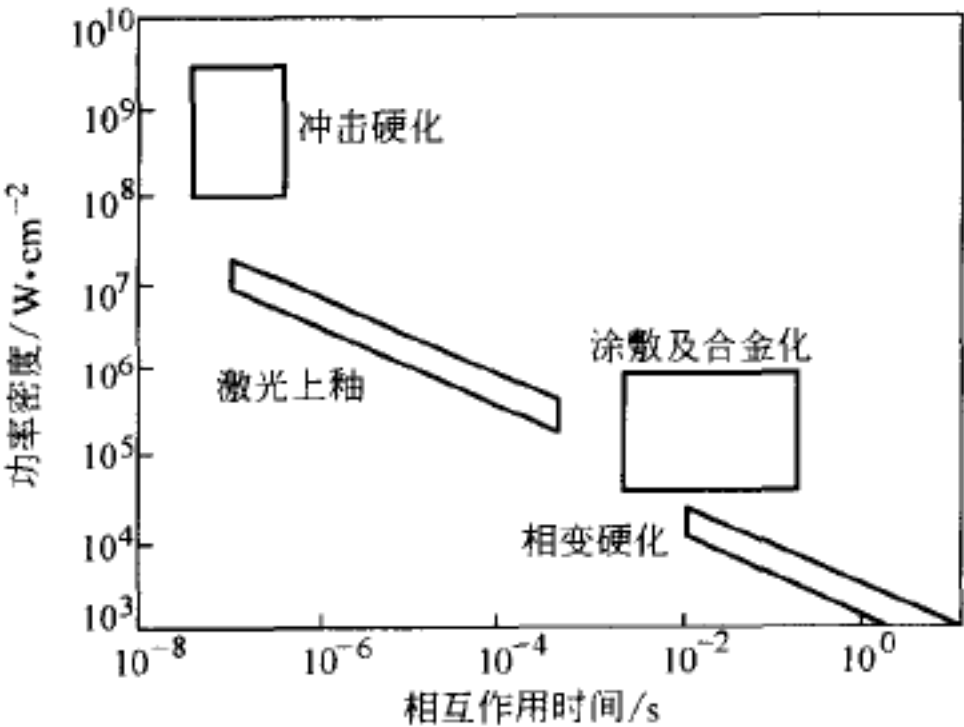


图 11-34 不同激光表面改性处理的功率密度和作用时间

表 11-88 激光合金化研究范围

基体材料	添加的合金元素	硬度 HV	基体材料	添加的合金元素	硬度 HV
Fe、45 钢、40Cr 钢	B	1950 ~ 2100	Fe	石墨	1400
45 钢、GCr15 钢	MoS ₂ 、Cr、Cu	耐磨性提高 2 ~ 5 倍	Fe	TiN、Al ₂ O ₃	≤ 2000
T10 钢	Cr	900 ~ 1000	45 钢	WC + Co	1450
ZL104 铸造铝合金	Fe	≤ 4800		WC + Ni + Cr + B + Si	700
Fe、45 钢、T8A 钢	Cr ₂ O ₃ 、TiO ₂	≤ 1080		WC + Co + Mo	1200
Fe、GCr15 钢	Ni、Mo、Ti、Ta、Nb、V	≤ 1650	铬钢	WC	2100
1Cr12Ni12WMoV 钢	B 胺盐	1225		TiC	1700
		950		B	1600
Fe、45 钢、T8 钢	C、Cr、N、W、YG8 硬质合金	≤ 900	铸铁	FeTi、FeCr、FeV、FeSi	300 ~ 700
			AISI304 钢(不锈 钢)	TiC	58HRC

表 11-89 激光熔化—粉末喷注数据

样品	激 光 处 理	维氏硬度范围 HV		熔深/μm		处理缺陷
		T1 钢	M2 钢	T1 钢	M2 钢	
1	基体熔化(一道)	650 ~ 900	650 ~ 900	230	240	无
2	BN 粉末喷注和一次激光熔化	1140 ~ 1360	1050 ~ 1190	200	220	少量裂纹和孔洞
3	BN 粉末喷注和 4 次激光熔化	1570 ~ 1840	1090 ~ 1240	310	320	一些孔洞
4	BN 粉末喷注和 10 次激光熔化	1200 ~ 1940	1190 ~ 1840	840	670	孔洞
5	样品 4 次激光重熔	1750 ~ 2150	1700 ~ 1930	840	670	很少裂纹和气孔

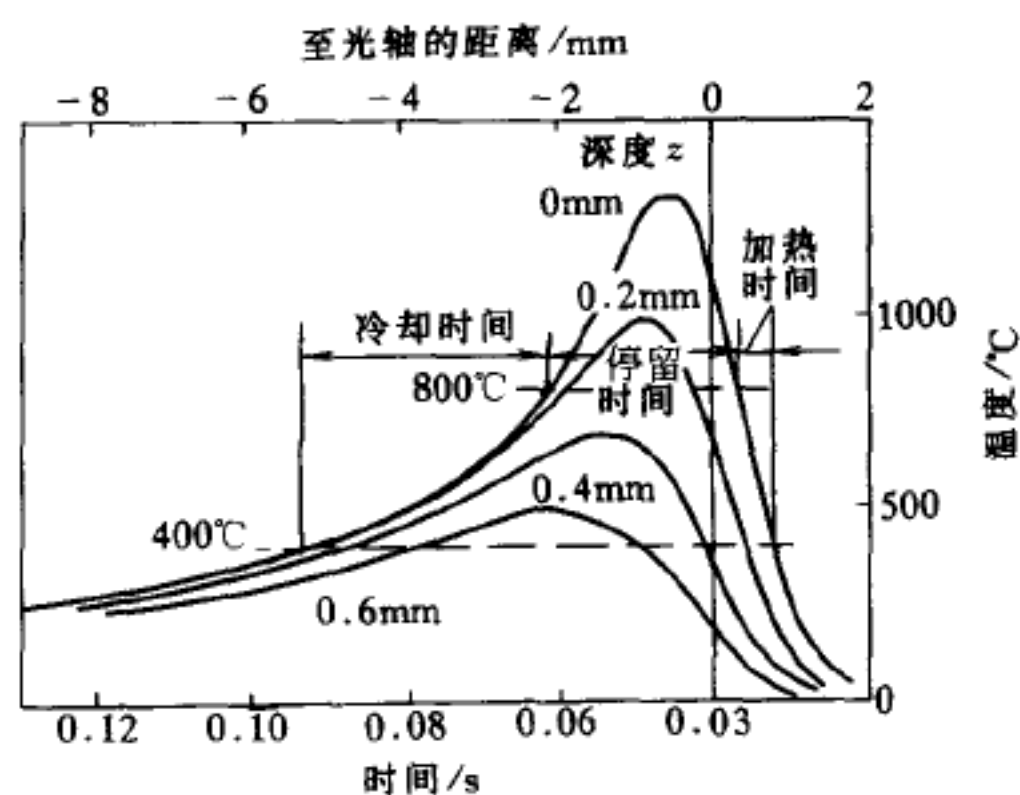


图 11-35 激光相变硬化随时间变化的温度场

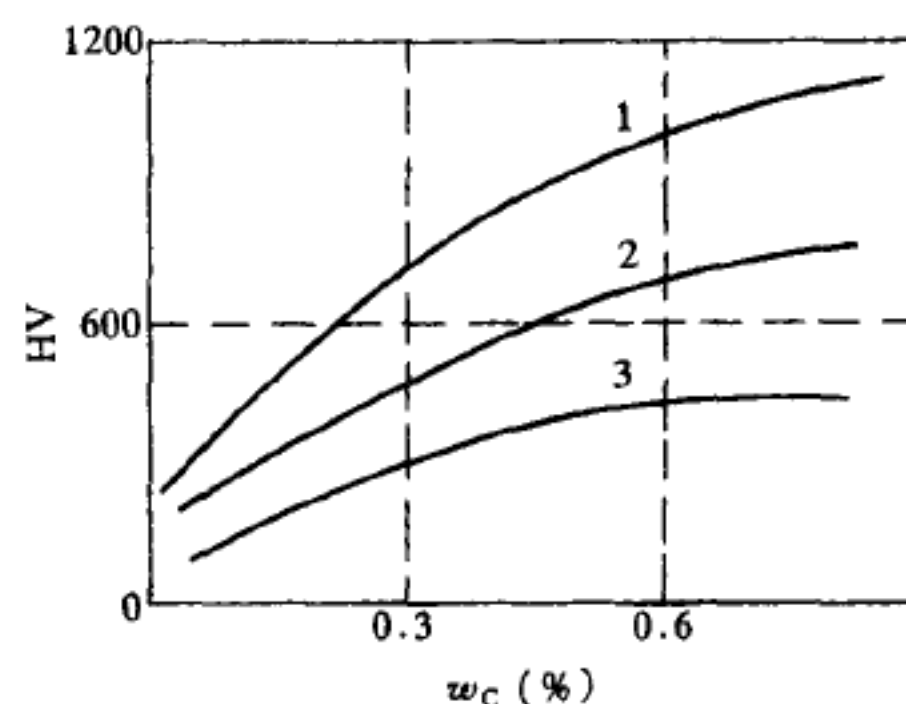


图 11-36 钢的显微硬度与碳含量之间的关系

1—激光淬火 2—常规淬火 3—非强化状态

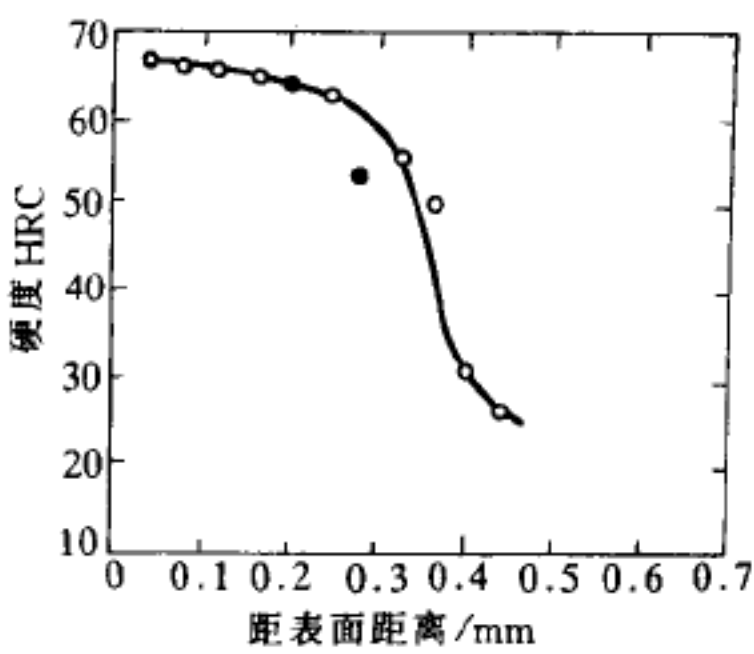


图 11-37 45 钢激光淬火后的硬度分布

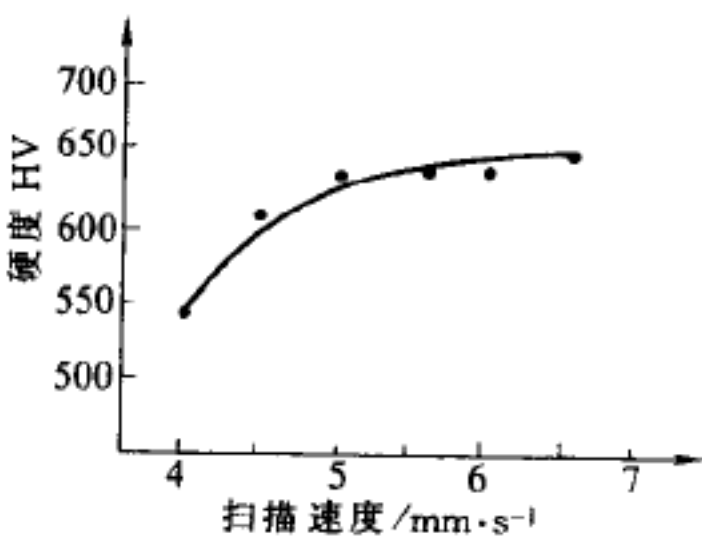


图 11-38 42CrMo 钢激光表面淬火硬度与扫描速度的关系(输出功率 400W)

表 11-90 电子束淬火工艺参数

编号	材料	束斑尺寸 /mm	加速 电压 /kV	束流/mA				试样移 动速度 /mm·s ⁻¹	编号	材料	束斑尺寸 /mm	加速 电压 /kV	束流/mA				试样移 动速度 /mm·s ⁻¹
				1	2	3	4						1	2	3	4	
301	45 钢	8×6	50	35	37	33	40	5	306	2Cr13	8×6	50	35	37	45		5
302	45 钢	8×6	50	45	47	43	41	10	306'	2Cr13	8×6	50	45	49	47		10
303	45 钢	8×6	50	55	57	53	51	20	307	2Cr13	8×6	50	55	57	59		20
304	45 钢	8×6	50	65	67	63	61	30	307'	2Cr13	8×6	50	65	63	61		30
305	45 钢	8×6	50	70	70			40	308	2Cr13	8×6	50	69	69			40

表 11-91 电子束表面合金化工艺及结果

粉 末		WC/Co	WC/Co + TiC	WC/Co + Ti/Ni	NiCr/Cr ₃ C ₂	Cr ₃ C ₂
粉末中合金元素含量 (质量分数)(%)		W82.55 C5.45 Co12.0	W68.52 C7.92 Ti13.60 Co9.96	W68.52 C4.52 Co9.96 Ti7.65 Ni9.35	Ni20.0 Cr70.0 C10.0	Cr86.7 C13.3
涂层厚度/mm		0.11 ~ 0.12	0.10 ~ 0.13	0.13 ~ 0.15	0.16 ~ 0.22	0.15 ~ 0.17
电子束工 艺参数	功率/kW	1.82	2.03	1.89	1.24	1.24
	束斑尺寸/mm	7×9	7×9	7×9	6×6	6×6
	移动速度/mm·s ⁻¹	5	5	5	5	5
合金层	深度/mm	0.50	0.55	0.50	0.45	0.36
	显微硬度/HV0.1	913 ~ 981	~ 1018	~ 946	~ 557	557 ~ 642
	显微组织	M + 碳化物	M + 碳化物	M + 碳化物	γ + 碳化物	γ + 碳化物
合金层成分 (质量分数) (%)	C	1.55 ~ 1.65	1.81 ~ 2.22	1.51 ~ 1.67	3.85 ~ 5.12	5.80 ~ 6.52
	Ni			2.43 ~ 2.81	7.11 ~ 9.78	
	Cr				24.89 ~ 34.22	36.13 ~ 40.94
	W	18.16 ~ 19.81	12.46 ~ 16.20	17.82 ~ 20.56		
	Ti		2.47 ~ 3.21	1.99 ~ 2.30		
	Co	2.64 ~ 2.88	1.81 ~ 2.35	2.59 ~ 2.99		
	Fe	77.65 ~ 75.66	81.45 ~ 76.02	73.66 ~ 69.67	64.15 ~ 50.88	58.07 ~ 52.54

表 11-92 42CrMo 钢电子束表面淬火效果

序号	加速电压 /kV	束 流 /mA	聚焦电流 /mA	电子束功率 /kW	淬火带宽度 /mm	淬火层深度 /mm	硬 度 HV	表层金相组织
1	60	15	500	0.90	2.4	0.35	627	细针马氏体 5~6 级
2	60	16	500	0.96	2.5	0.35	690	隐针马氏体
3	60	18	500	1.08	2.9	0.45	657	隐针马氏体
4	60	20	500	1.20	3.0	0.48	690	针状马氏体 4~5 级
5	60	25	500	1.50	3.6	0.80	642	针状马氏体 4 级
6	60	30	500	1.80	5.0	1.55	606	针状马氏体 2 级

注:试样尺寸:10mm×10mm×50mm,表面粗糙度为 $Ra0.4\mu\text{m}$;所用设备为 30kW 电子束焊机;加速电压为 60kV,聚焦电流为 500mA,扫描速度为 10.47mm/s,电子枪真空度为 $4\times10^{-2}\text{Pa}$,真空室真空度:0.133Pa。

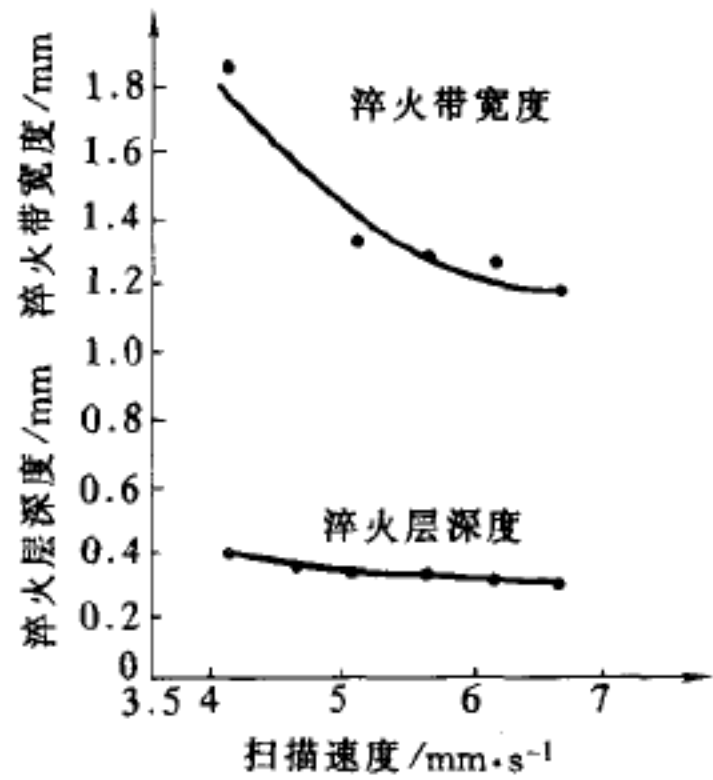


图 11-39 42CrMo 钢激光表面淬火层深度、淬火带宽度与扫描速度的关系(输出功率 400W)

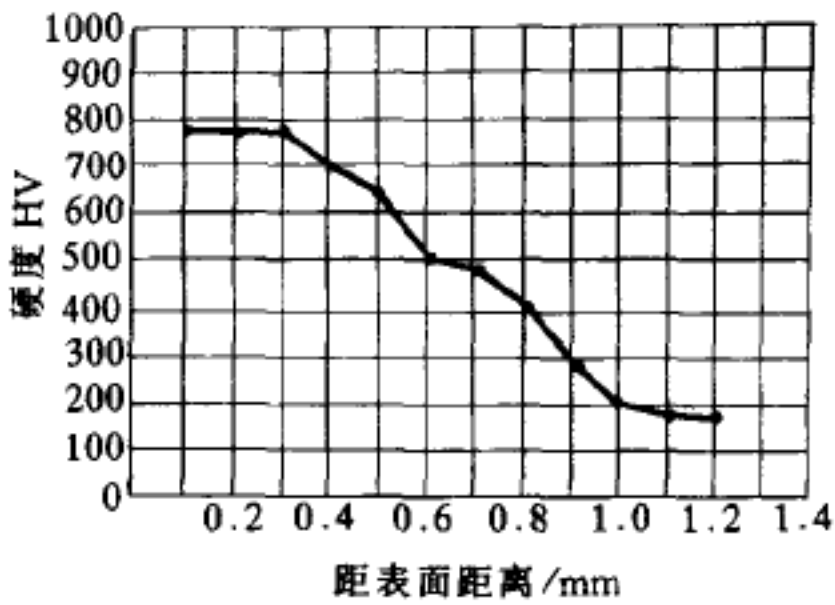


图 11-40 45 钢电子束硬化处理后的硬度分布曲线

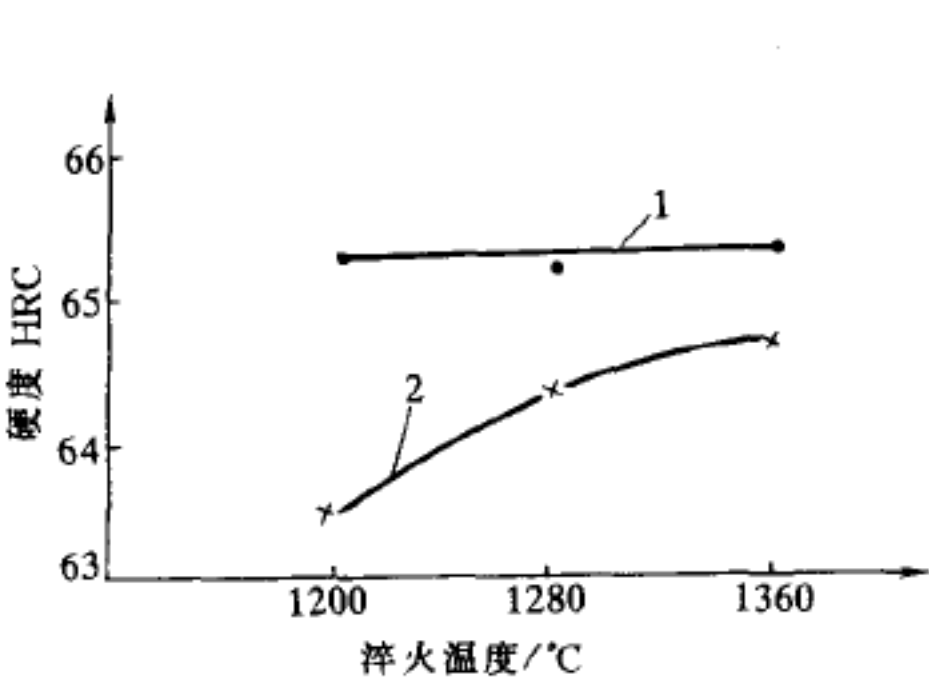


图 11-41 W18Cr4V 钢经电子束熔化凝固处理后,后续淬火温度对硬度的影响
1—电子束熔化凝固+淬火 2—常规淬火

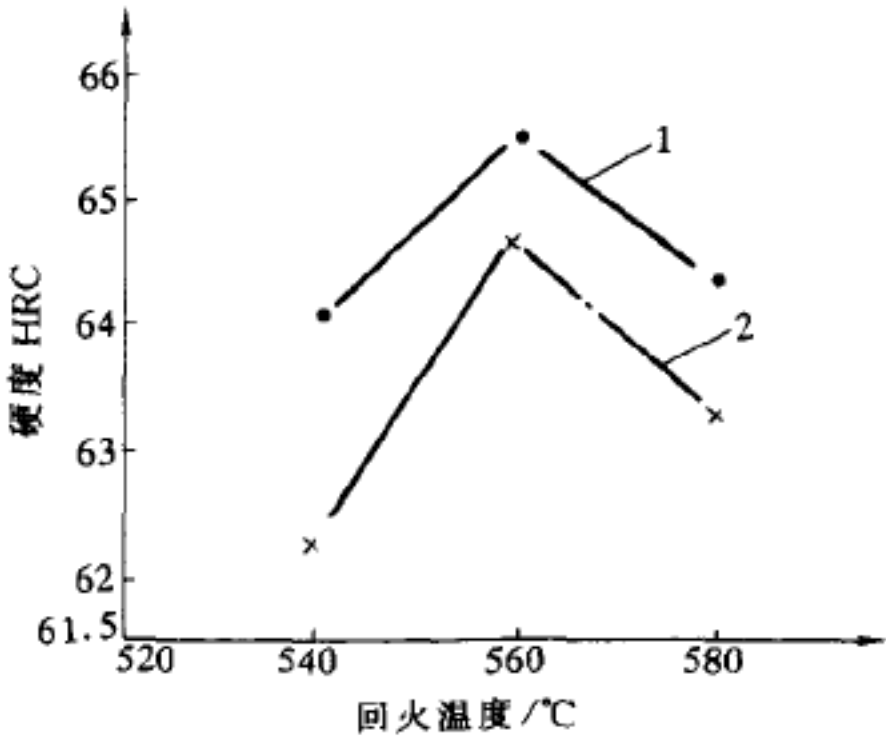


图 11-42 W18Cr4V 经电子束熔凝处理淬火后回火温度对硬度的影响
1—电子束熔凝处理 2—常规处理

11.4 离子注入处理工艺规范及效果(表 11-93 ~ 表 11-100 和图 11-43)

表 11-93 离子注入在机械加工中的应用

改性效果	注 入 离 子	基 体 材 料	用 途
抗磨损	Ti、Mn、Al、Cu、Ni、W、Mo、V、Co、Cr	型钢、软钢 工具钢	机械零件、工具
	Ti + C、Ti + N、Ti + B、Cr + N	型钢、软钢、工具钢 不锈钢	机械零件、工具、汽车零件 表壳、模具
	Al、Sn、In、Ag	轴承钢、型钢	精密机械零件
耐腐蚀 抗氧化	Cr、Ni、Pd、Pt、Al Cr + Mo、Ta、Cr + P、 稀土	型钢、M50 钢 52100 钢、M50 钢 型钢、不锈钢	海军飞机零件、机械零件 海军飞机轴承、各种轴承 机械零件
抗冲击	Nb、Ta、Mo、W	模具钢	模具
耐热	Al、Mo、W、Nb、Ta、Cr	耐热钢、型钢	飞机和汽车发动机排气管

表 11-94 离子注入用离子源

离子源类型	束 斑	总离子流/mA	离子流密度/mA·cm ⁻²	工作气压/Pa	工作物质	功耗/W
双等离子体	细束	1 ~ 100	10 ~ 100	1 ~ 10	气体、固体	1000
潘宁源	φ2 ~ 3mm	1 ~ 1000	0.1	10 ⁻¹	气体	1000
尼尔逊源	φ2mm	1 ~ 1000	0.1	10 ⁻¹	气体、固态	1000
弗利曼源	4.5mm × 45mm	1 ~ 10	1 ~ 10	10 ⁻¹ ~ 1	气体、固体	500 ~ 1000
MEVVA 源	宽束	1 ~ 100	1 ~ 10	10 ⁻¹ ~ 1	固体	~ 1000
考夫曼源	宽束	1 ~ 100	1 ~ 10	10 ⁻¹ ~ 1	气体	500

表 11-95 离子注入陶瓷层表面硬度

材 料	离 子	注入量/×10 ¹⁶ ·cm ⁻²	能量/keV	靶温/K	相对硬度	测 法	结 构
Al ₂ O ₃ (c 轴)	Cr	1 ~ 10	280	300	1.27 ~ 1.55	K-15	无序
	Cr	4	280	640	1.1	K-15	
	Cr	0.3	280	77	0.6	K-15	
	Al + O	4 + 6	90 + 50	77	0.45	ULL	
	Fe、Cu、Ti、W、Mo	1.5 ~ 4.0	多重	300	1.1 ~ 1.4	K-15	
a-轴	Ni	10	300	300	1.3	K-25	无序
	Ni	10	300	100	0.6	K-25	
	Y	3	300	300	1.57	K-25	
	Y	60	300	300	0.7	K-25	
	Ti	3.4	300	300	1.3	K-25	
MgO(100)	Cr	3.2	300	300	1.11	K-25	无序
	Ti	2.0	300	300	2.3	K-10	
	Ti	35	300	300	0.8	K-10	
	Cr	6	300	300	2.0	K-10	
	Al	1	190	300	1.28	K-50	
ZrO (Y-FSZ)	Al	40	190	300	0.83	K-50	无序
	Ti	3	400	300	1.6	K-10	
	Ti	10	400	300	0.9	K-10	

(续)

材 料	离 子	注入量/ $\times 10^{16} \cdot \text{cm}^{-2}$	能量/keV	靶温/K	相对硬度	测 法	结 构
TiB ₂ 烧结	Ni	10	1000	300	1.7 ~ 2.1	K-15	无序 无序 无序
SiC(c 轴)	Cr	0.04	280	300	1.2	K-15	
	Cr	0.2	280	300	0.55	K-15	
	N ₂	80	80	300	0.37	V-25	
SiC(烧结)	Ar	1.0	800	300	0.5	V-100	

注:K—努氏硬度,V—维氏硬度,ULL—超低负载,数字表示测量用克数。

表 11-96 离子注入 H13 钢表面硬度 HV、磨损下降率 R 和摩擦系数 μ 与注入条件的关系

离 子	$\phi/\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$	E/keV	$D/\times 10^{17} \text{cm}^{-2}$	HV	$R(\%)$	μ
未注入	0	0	0	4000	100	0.8
Mo	46	40	3.0	5000	80	
V	46	40	6.0	5030	79	
Ti	25	30	5.0	7500	53	0.2
Ti	5.6	180	3.0	8300	48	0.2
Ti	5.6	300	3.0	15200	26	0.2
C	20	30	9.0	9000	44	0.35
W + C	50 + 50	40 + 30	3 + 4	16510	24	
Ti + C	20 + 20	40 + 30	6 + 9	11000	36	0.20
V + C	40 + 20	40 + 30	3 + 4	17000	24	0.25
Mo + C	50 + 50	40 + 30	3 + 4	17000	24	0.46

表 11-97 离子注入 H13 钢和 Al 中的析出相

离 子	衬 底	引出电压 /keV	$D/\times 10^{17} \text{cm}^{-2}$	束流密度 / $\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$	状 态	金属化合物
Ti	H13 钢	25 ~ 50	3 ~ 5	25	脉冲	Fe ₂ Ti
Ti	H13 钢	100 ~ 300	2 ~ 5.5	5.6	连续	Fe ₂ Ti、FeTi
Mo	H13 钢	25 ~ 50	2 ~ 5	≥ 47	脉冲	σ -FeMo、Mo ₂ C、Mo ₆ Fe ₇
W	H13 钢	20 ~ 50	2.0	68.0	脉冲	Fe ₇ W ₆ 、Fe ₂ W
C	H13 钢	25 ~ 50	5.0	≥ 25.0	脉冲	Fe ₂ C
Ti + C	H13 钢	25 ~ 50	5.0	≥ 25.0	脉冲	Fe ₂ C、Fe ₂ Ti、TiC
Ti	Al	25 ~ 50	5.0	> 25.0	脉冲	Al ₃ Ti、AlTi
W	Al	25 ~ 50	2.0	≥ 47	脉冲	Al ₃ W
Fe	Al	25 ~ 50	0 ~ 5	68.0	脉冲	Al ₂ Fe
Ti + N	H13 钢	100 ~ 300	2 ~ 5	5.6	连续	Fe ₂ Ti、Fe ₂ N、TiN
Mo	Al	25 ~ 40	2 ~ 5	≥ 47	脉冲	Al ₁₂ Mo

表 11-98 N 离子注入刀具工业应用($4 \times 10^{17}/\text{cm}^2$, 100 ~ 150keV)

名 称	材 料	效 果
裁纸刀	1.6Cr1C	延寿 2 倍
橡胶切刀	WC-6% Co	延寿 12 倍
醋酸纤维板切刀	铬钢	增产
酚醛树脂纤维切刀	M ₂ 高速钢	延寿 5 倍
螺纹铣刀	M ₂ 高速钢	延寿 5 倍
塑料切刀	铬钢	增产
牙科钻头	WC-6% Co	延寿 2 ~ 7 倍
电路板钻头	WC-6% Co	延寿 2 ~ 4 倍
齿轮插刀	WC-6% Co	延寿 2 倍
薄钢板切刀	WC-6% Co	延寿 3 倍
面包切刀	高速合金钢	延寿 6 ~ 8 倍

表 11-99 离子注入模具工业应用

名 称	材 料	效 果
反向挤压模	WC-6% Co	延寿 3 倍
铜丝拉模	WC-6% Co	延寿 4 ~ 6 倍
铜杆拉模	WC-6% Co	产量提高 5 倍
压延模	WC-6% Co	产量提高 5 倍
环形冲压模	工具钢	汽车零件增产 10 倍
罐头压痕模	D ₂ 钢	延寿 3 倍
金属导槽	硬铬板	延寿 3 倍
钢丝拉模	WC-6% Co	延寿 3 倍
凹槽模	WC-6% Co	延寿 18 倍
注塑模	WC-6% Co	延寿 5 ~ 10 倍
硅钢片冲头	WC-6% Co	延寿 6 倍
大型注塑杆	工具钢	延寿 18 倍
金属轧滚	工具钢	延寿 5 ~ 8 倍

表 11-100 离子注入军用产品关键部件的工业应用

名 称	材 料	注入离子	效 果
气轮机轴承(卫星)	440C 不锈钢	Ti + C($3 \sim 5 \times 10^{17}/\text{cm}^2$) Cr + C	延寿 100 倍
火箭发动机主轴承	M-50 钢	Cr($1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$)	改善点蚀
气轮机仪表轴承	M-50 钢	Pb, Ag	固态润滑
真空仪表轴承	52100 钢	Pb, Ag, Sn	降低摩擦系数
直升飞机主轴承	52100 钢	Cr, Cr + C, Cr + Mo	防腐、抗磨损
低温轴承(航天)	440C 不锈钢	Cr + N, Ti + C	磨损率下降 400 倍
气轮机燃料喷口	—	Ti, B	延寿 2 ~ 7 倍
燃料喷嘴	—	N	延寿 10 倍

(续)

名 称	材 料	注入离子	效 果
航天用冷冻机阀门	—	Ti + C	延寿 100 倍
直升飞机主齿轮	9310 钢	Ta	载荷增加 30%

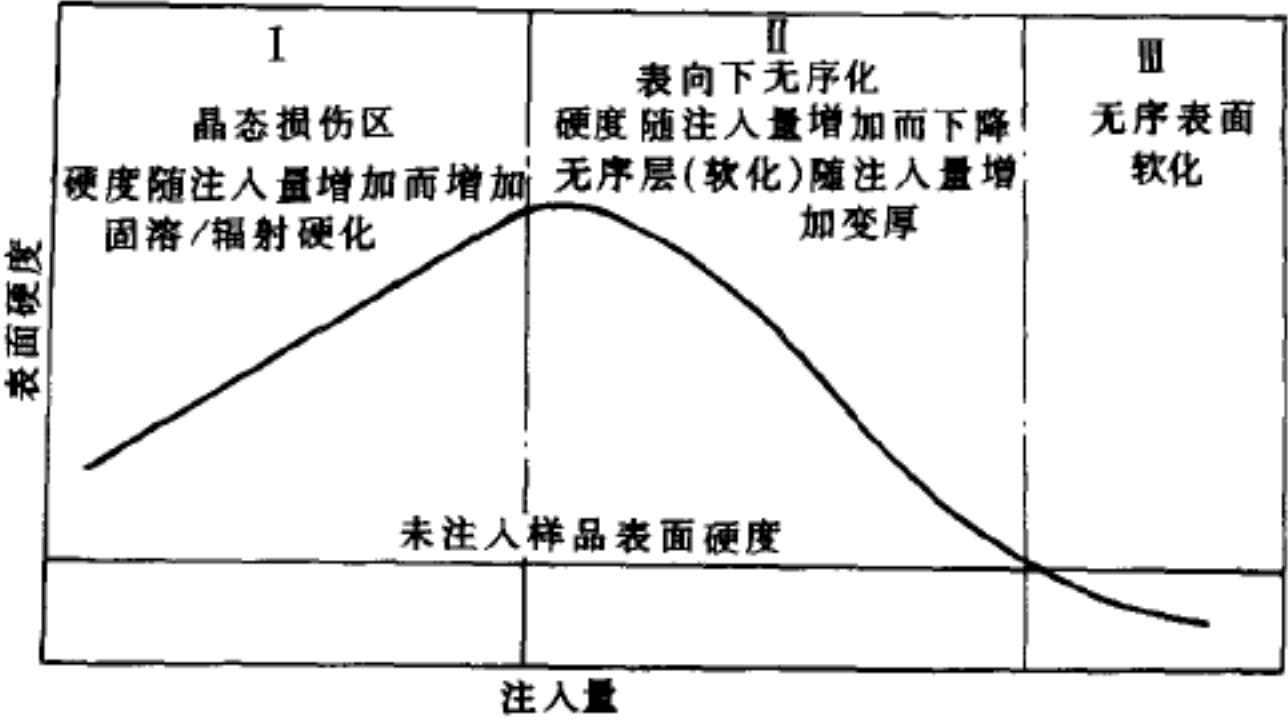


图 11-43 陶瓷表面离子注入层硬度与注入量的关系

第12章 化学热处理

12.1 铁和化学元素的二元、三元相图 (图 12-1 ~ 图 12-12)

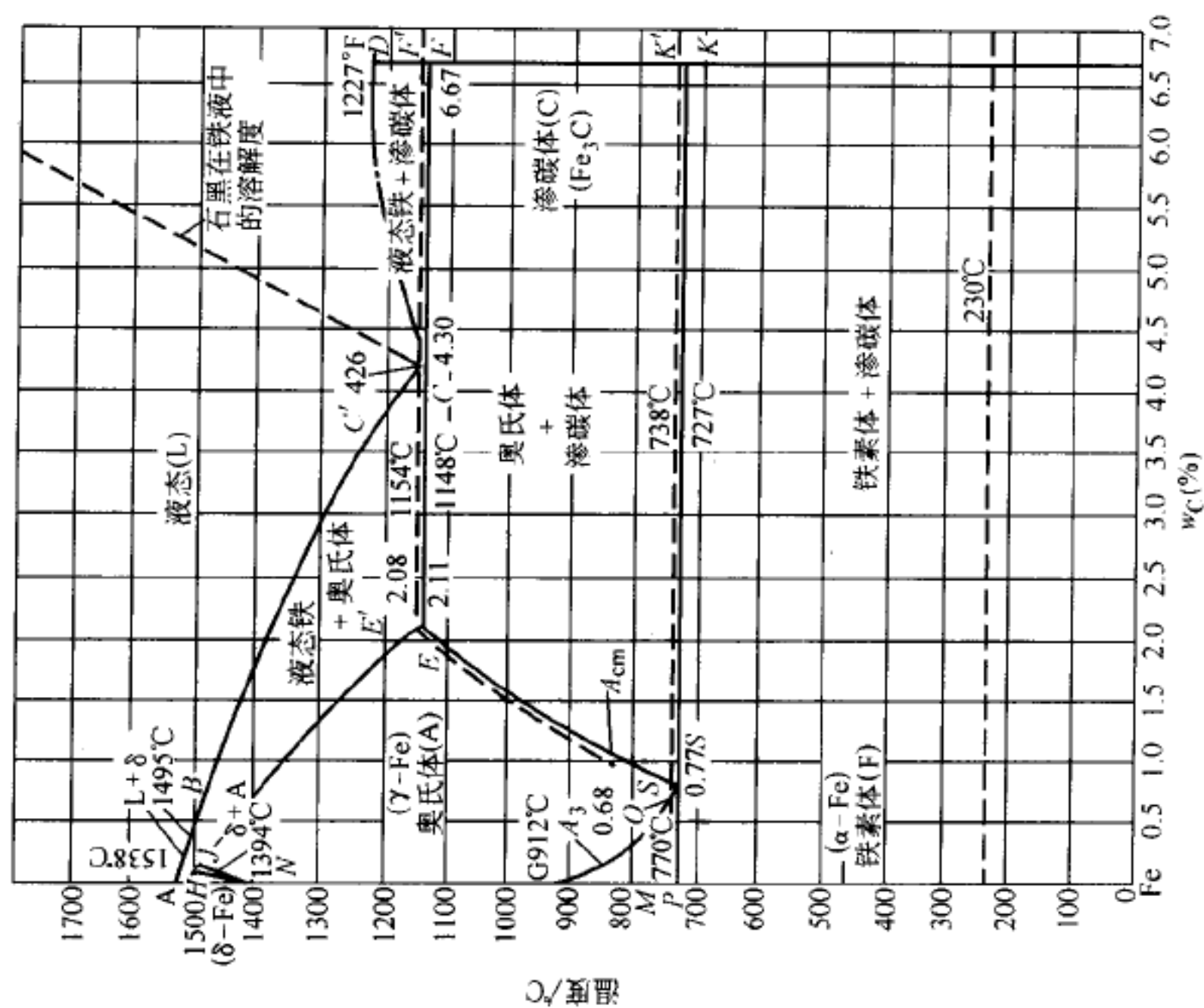


图 12-1 铁碳系相图

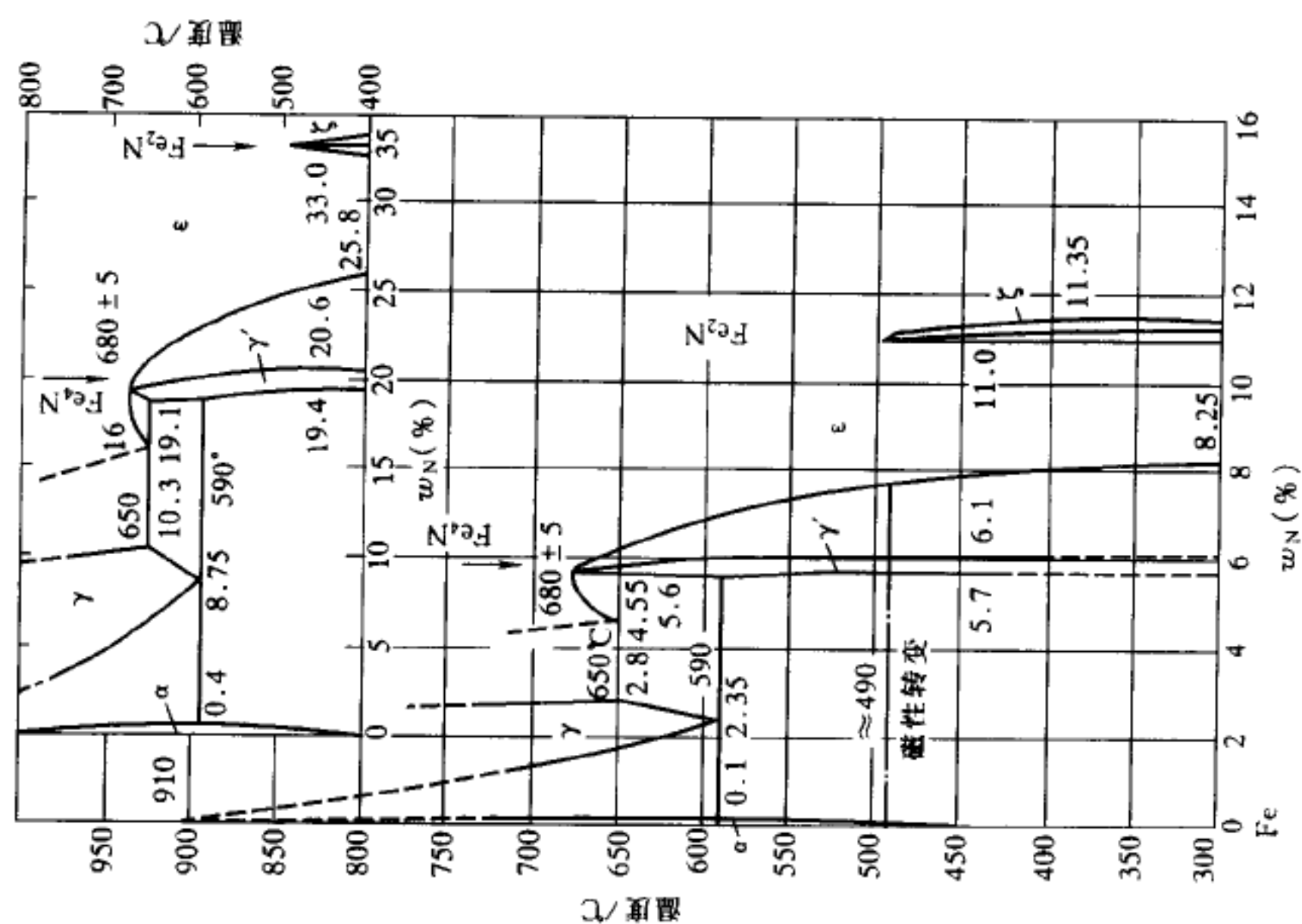


图 12-2 铁氮系平衡相图

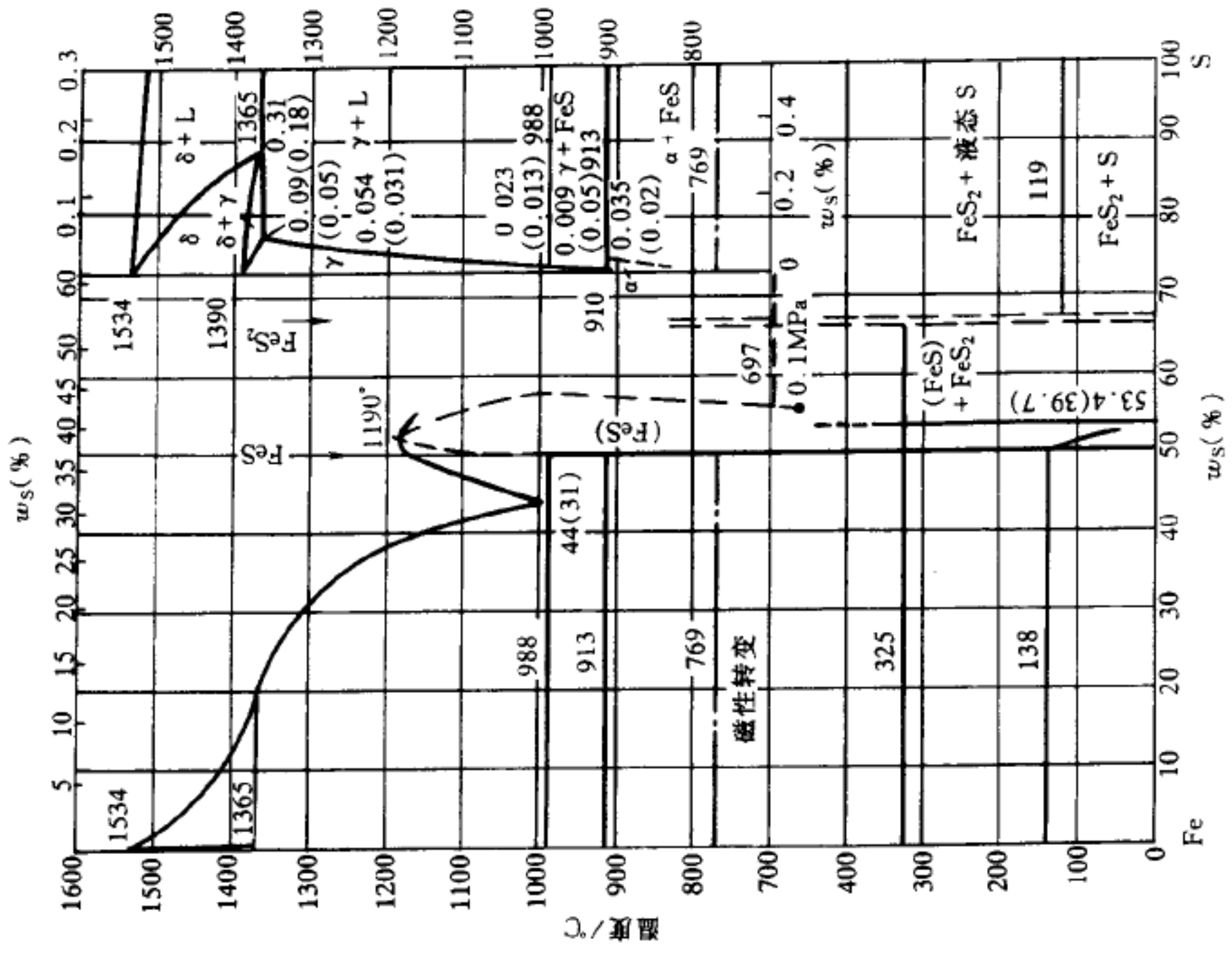


图 12-4 铁硫系平衡相图

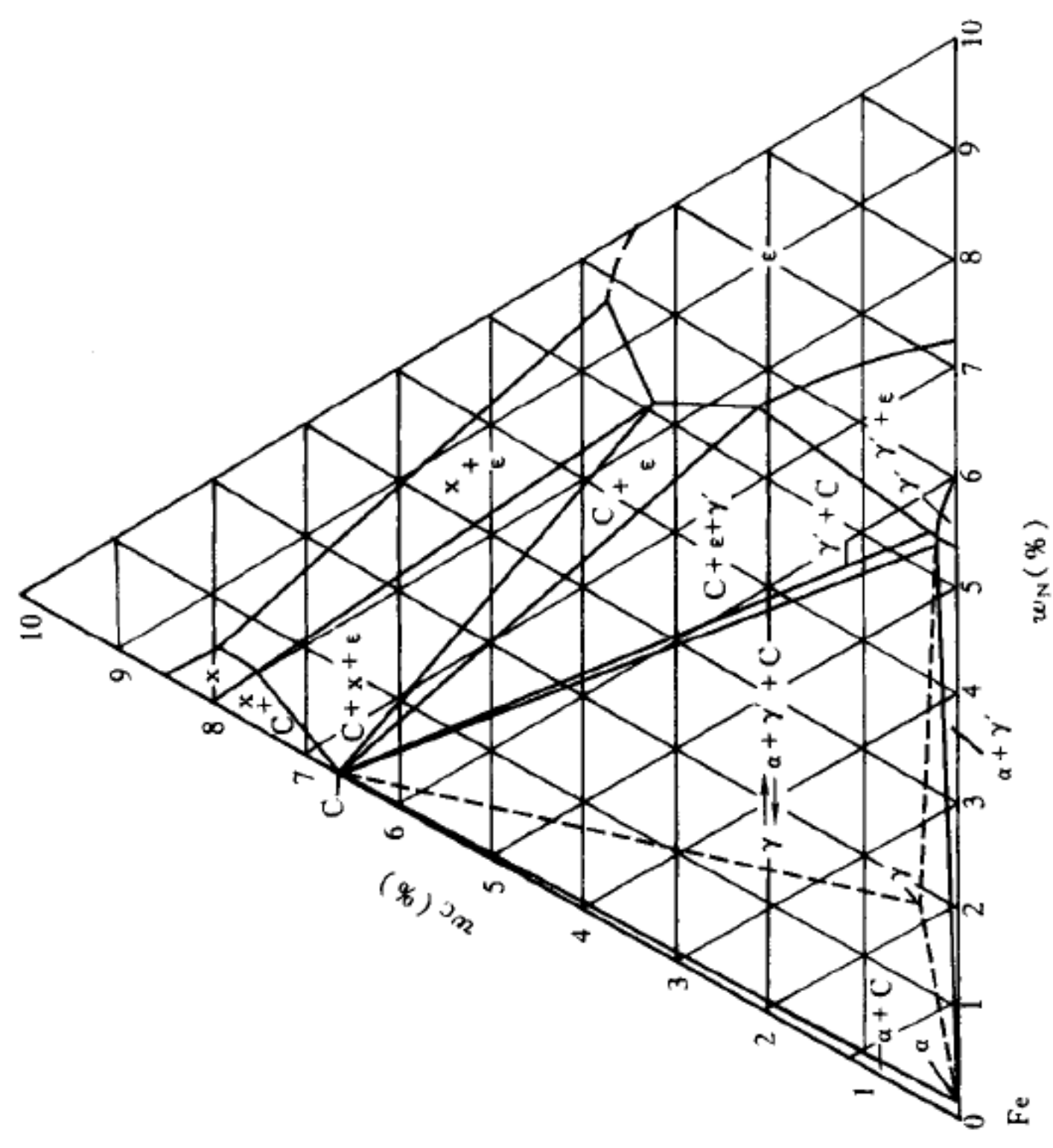


图 12-3 铁氮碳三元平衡图在 565°C 的等温截面

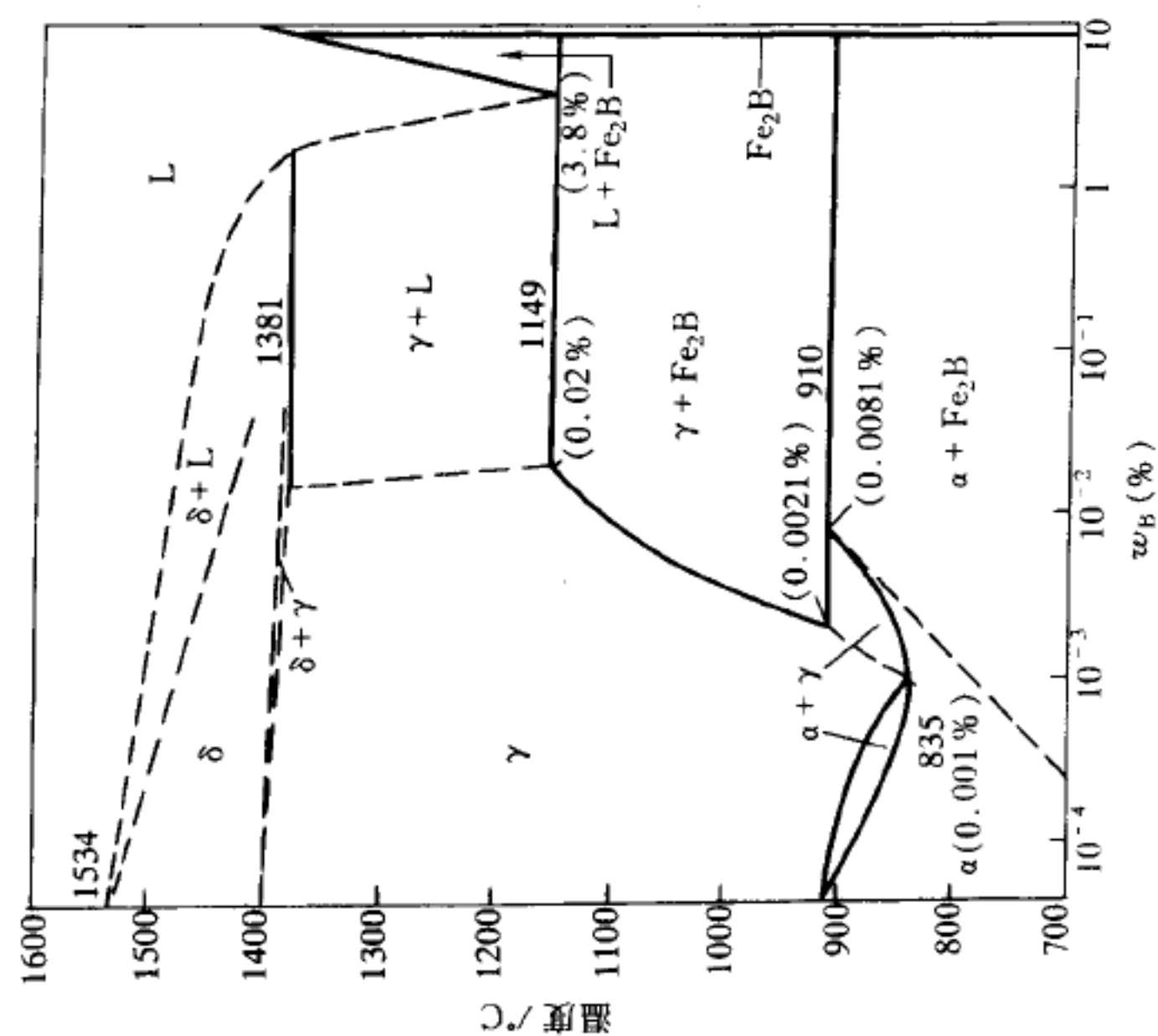


图 12-6 微量硼含量的铁硼系平衡相图

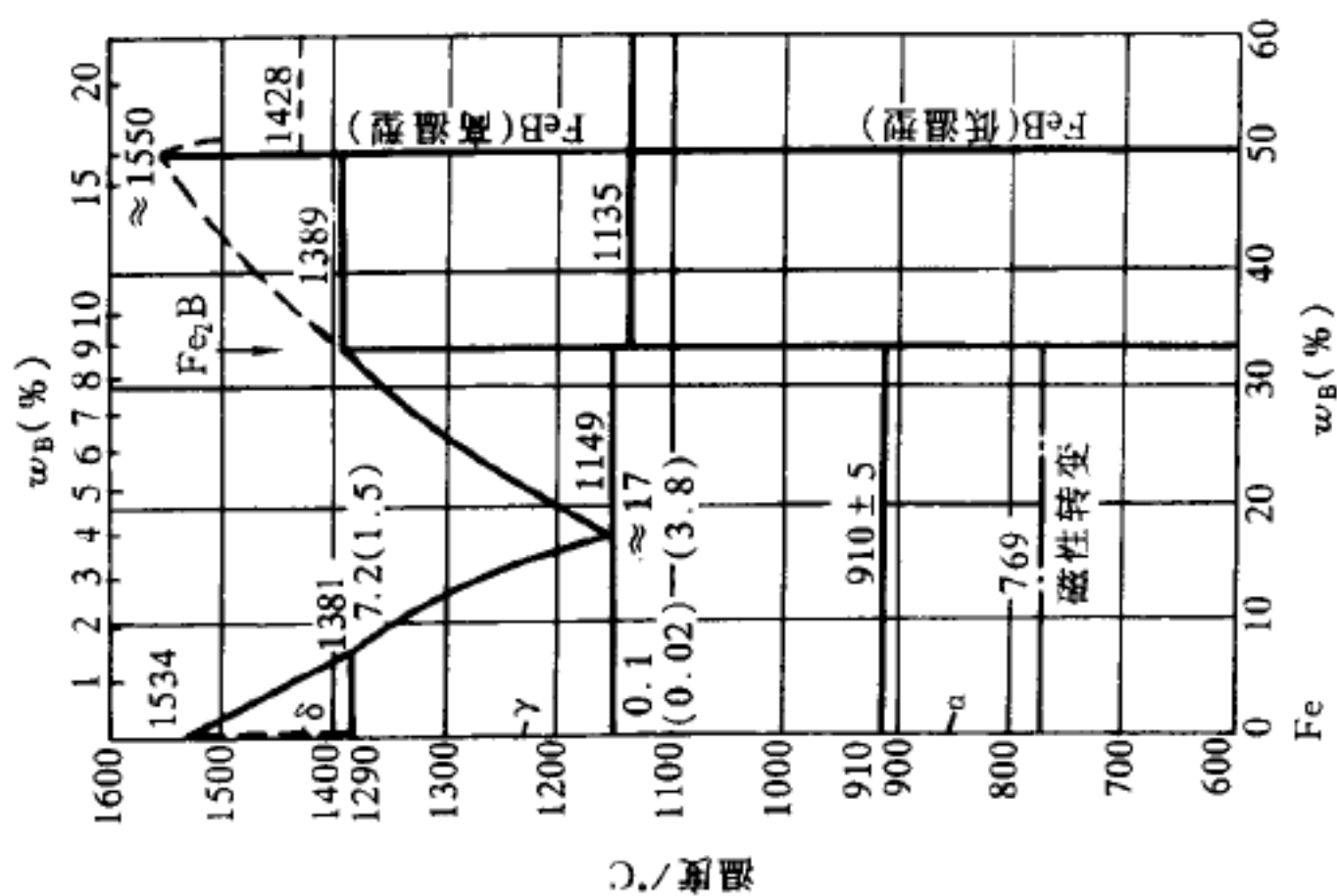


图 12-5 铁硼系平衡相图

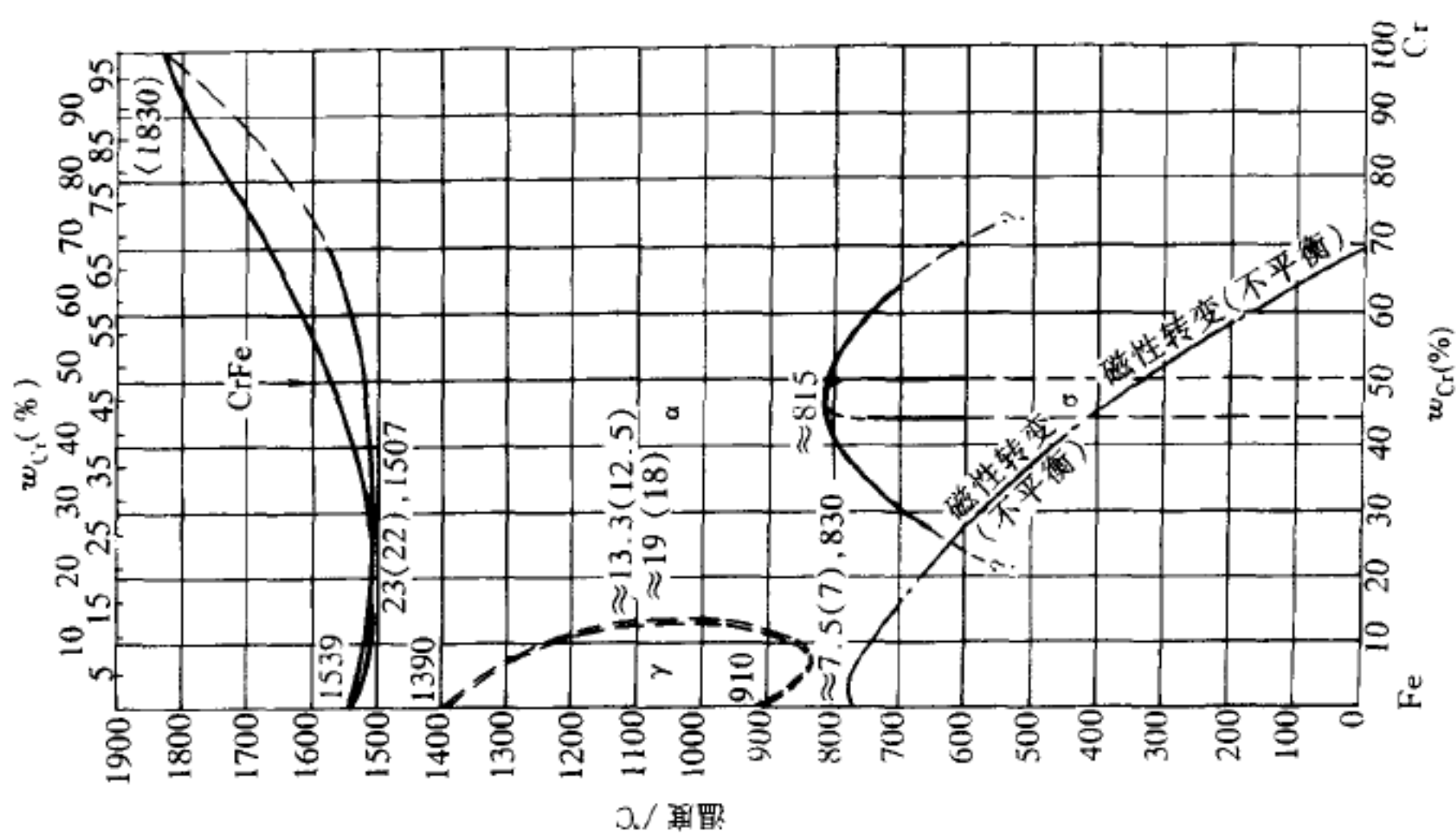


图 12-7 铁铬系平衡相图

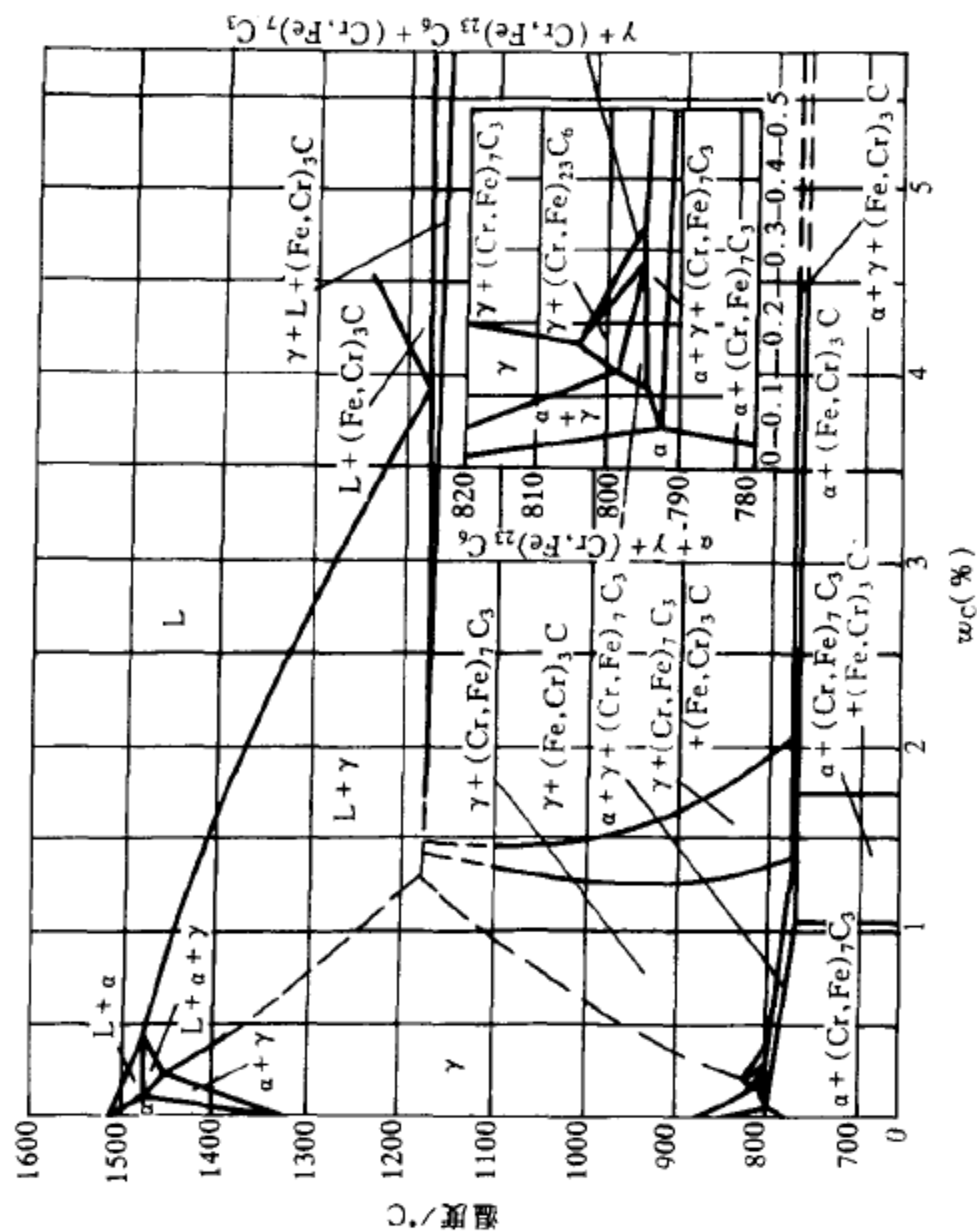


图 12-8 铁铬碳系含铬 5% 的垂直截面平衡相图

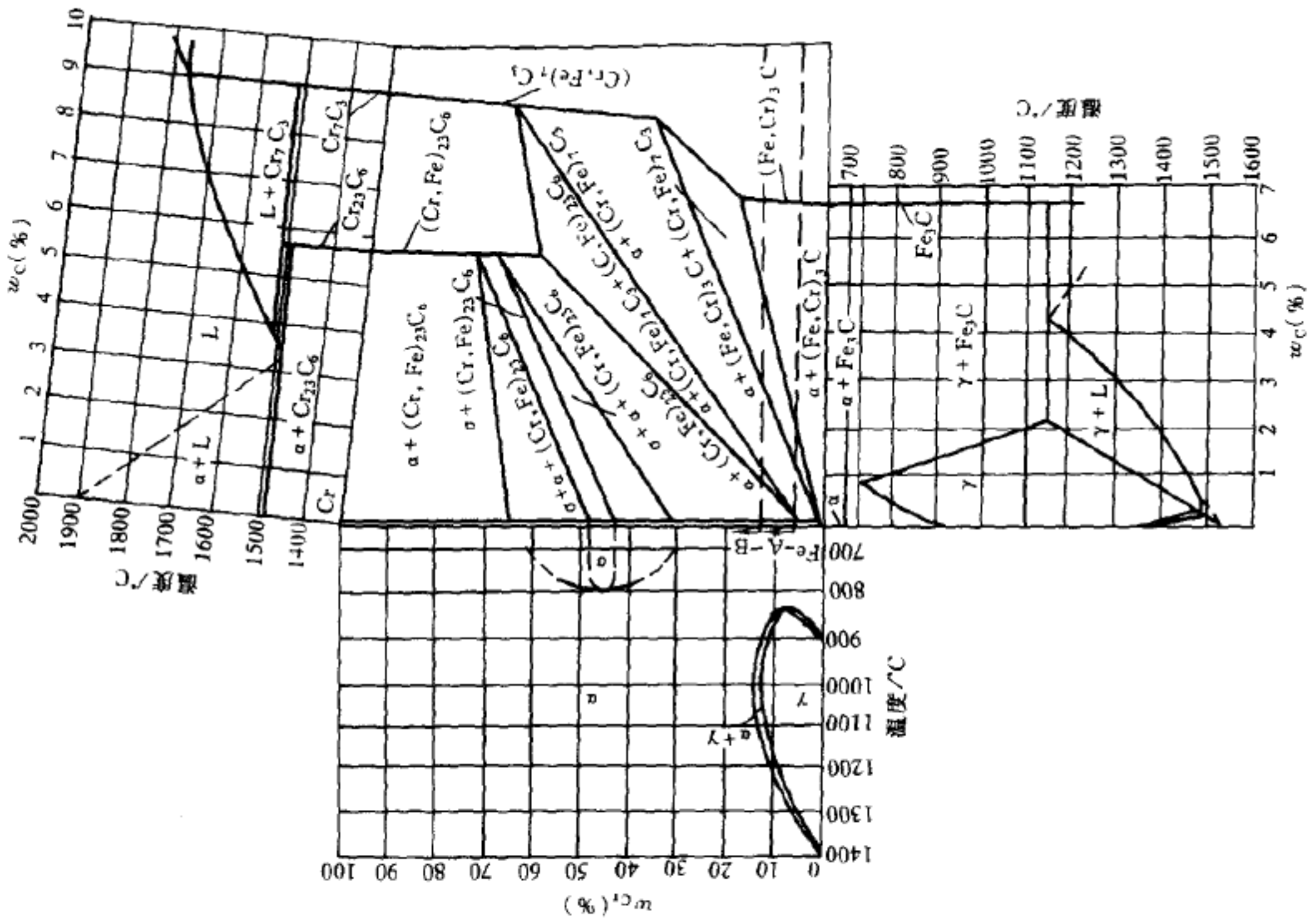


图 12-10 铁铬碳系平衡相图

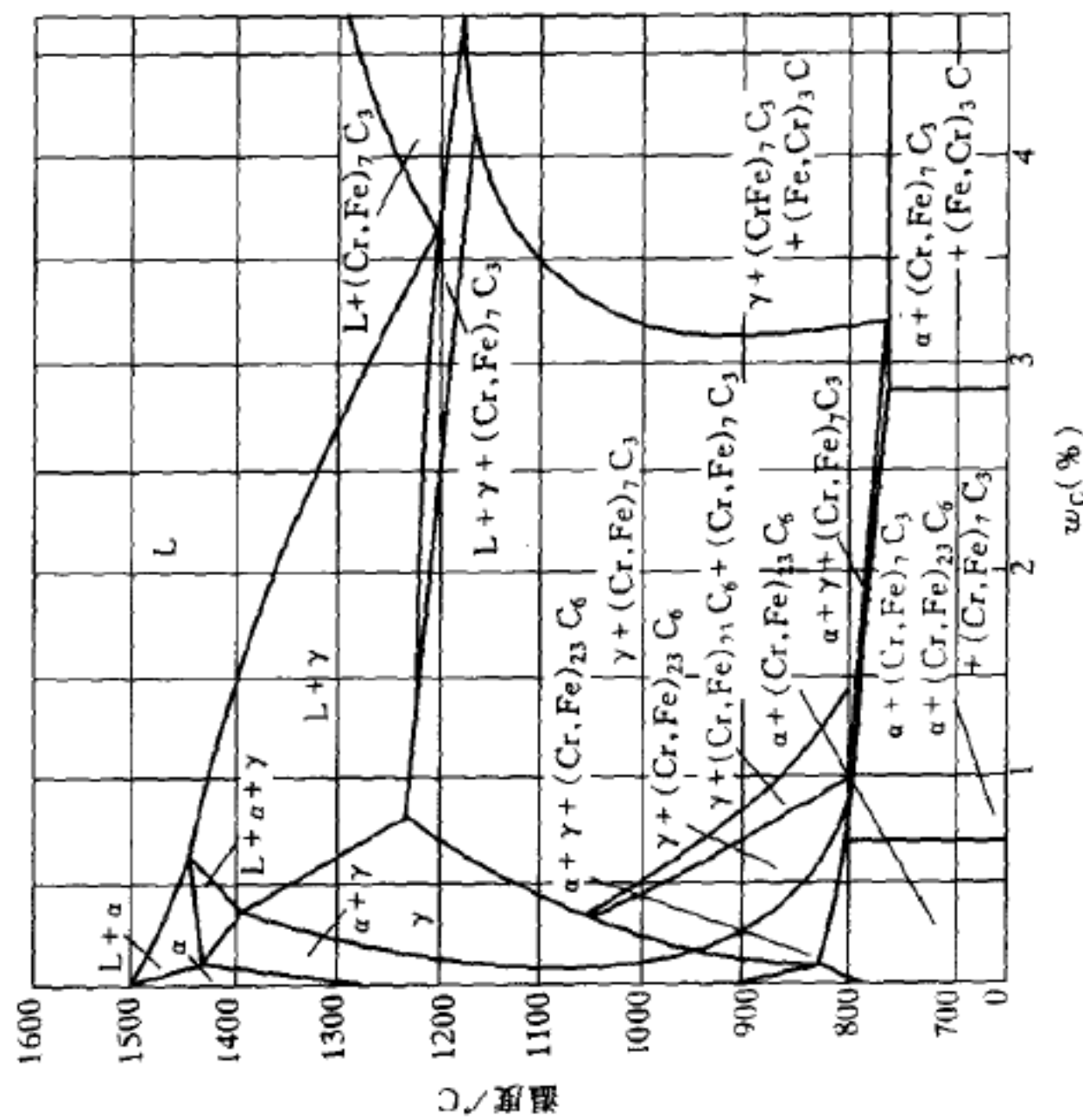


图 12-9 铁铬碳系含铬 13% 的垂直截面平衡相图

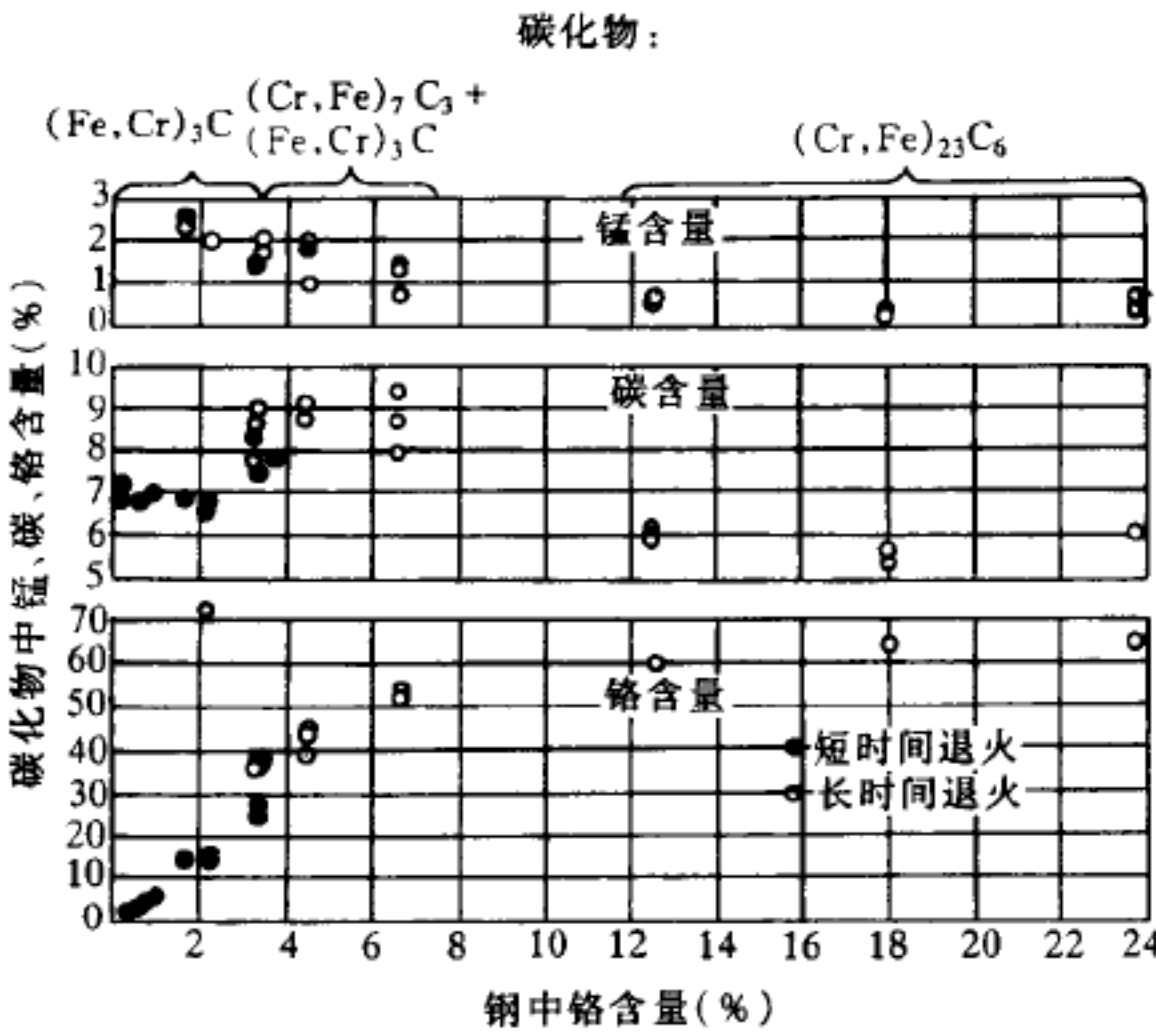


图 12-11 从含 0.8% ~ 1.2% 的铬钢中析出的碳化物成分

• —短时间加热 (750℃10h 炉冷及 800℃2h 炉冷)

○ —长时间加热 (750℃300h 炉冷及 800℃2h 炉冷)

(含量均为质量分数)

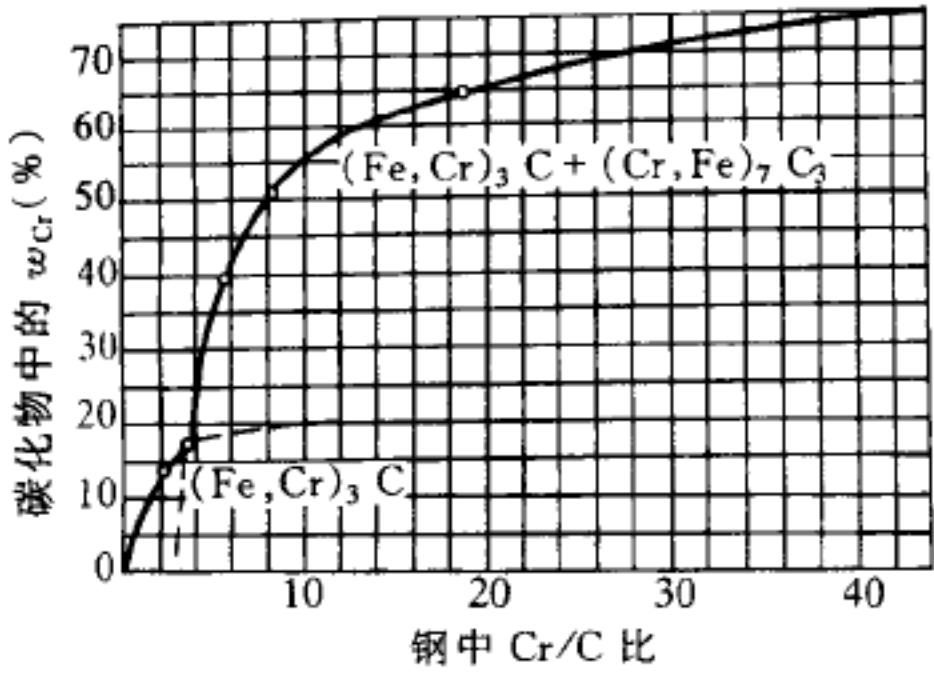


图 12-12 钢中铬与碳之比对碳化物中铬含量的影响

12.2 渗碳工艺及性能 (表 12-1 ~ 表 12-68 和图 12-13 ~ 图 12-67)

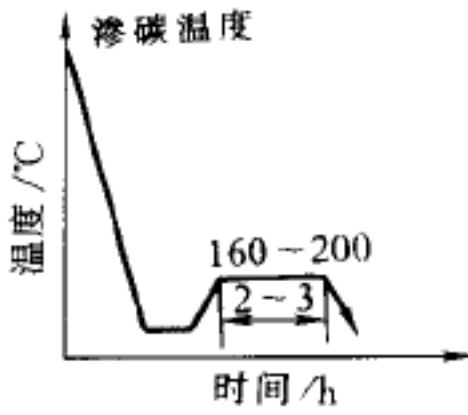
表 12-1 各种渗碳工艺过程、特点和应用范围

方法	原 理	渗 剂	渗后热处理	特点和应用范围
固体法	渗剂置于铸铁, 低碳钢或耐热钢罐中, 工件埋入渗剂, 用盖封好, 按 0.1mm/h 渗速和渗层深度要求确定渗碳时间。渗碳化学反应为: $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{C} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + 2\text{CO}$ $\text{CO}_2 + \text{C} \rightleftharpoons 2\text{CO}$ $\text{Fe} + 2\text{CO} \rightarrow \text{Fe}\gamma(\text{C}) + \text{CO}_2$	木炭中添加质量分数为 5% ~ 10% Na_2CO_3 或 BaCO_3 制成块状或条状	工件随箱冷却至常温, 然后重新加热至 830 ~ 850℃ 淬火, 最后施行 180 ~ 200℃ 回火	效率低, 劳动条件差, 表面碳浓度难控制, 但对加热炉要求低, 易于操作。适用于多品种小批量生产和深层渗碳
液体法	$2\text{NaCN} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CO} + 2\text{N}$ $\text{Fe} + 2\text{CO} \rightarrow \text{Fe}\gamma(\text{C}) + \text{CO}_2$ 低温浅层渗碳 (0.3 ~ 0.6mm) 850 ~ 900℃, 高温深层渗碳 (0.5 ~ 3.0mm) 900 ~ 950℃	NaCN , Ba-Cl_2 , NaCl 混合盐熔融	渗后, 工件冷到 A_r , 以下重新在中性盐浴中加热至 830 ~ 850℃ 水中 (碳钢) 或油中 (合金钢) 淬火, 然后在 180 ~ 200℃ 回火。低温浅层渗时, 渗后可直接淬火	渗速大, 渗层均匀, 适应性强, 但氰盐剧毒, 废盐和废水需经无害化处理方可排放, 适用于中小件多品种, 小批量生产、五金工具 (锉刀、锯条等) 的批量生产

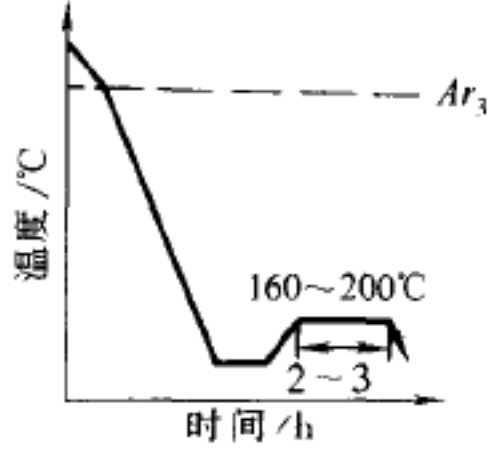
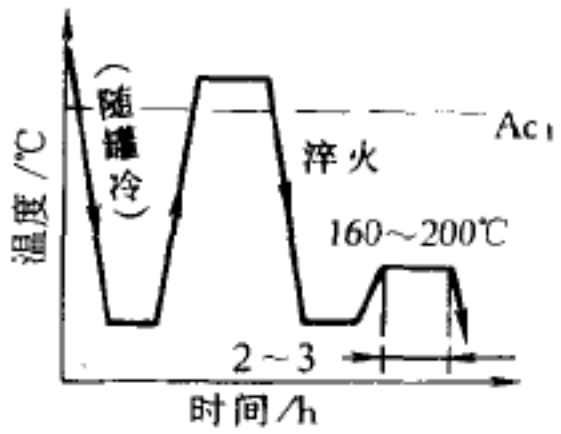
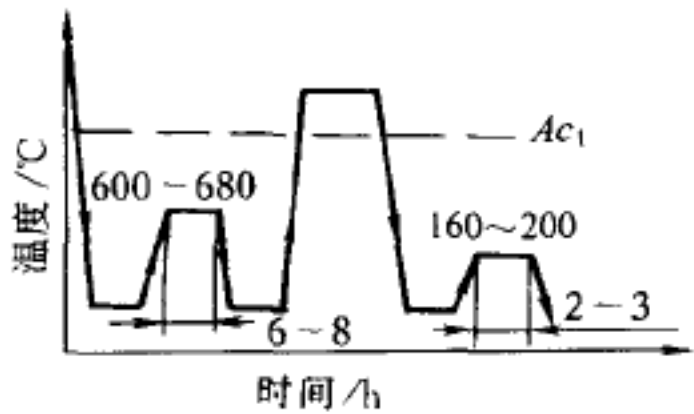
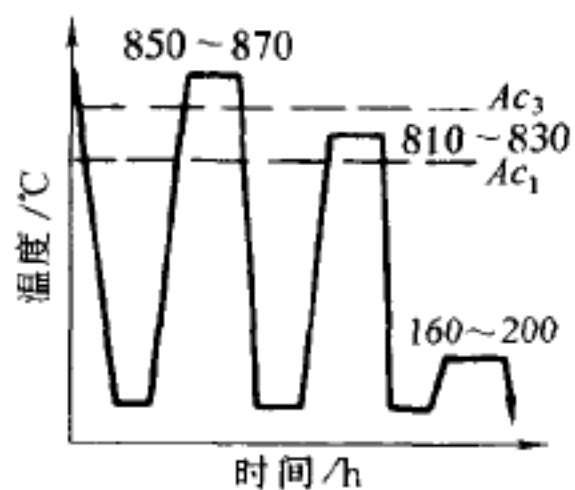
(续)

方法	原 理	渗 剂	渗后热处理	特点和应用范围	
膏剂法	膏状渗剂涂在工件表面, 厚 2 ~ 3mm, 以感应加热或炉中加热方式渗碳、900 ~ 950℃	炭黑粉、纯碱、醋酸钠、全损耗系统用的(机油)等混合	工件渗碳后冷至室温, 除去膏剂外壳, 重新加热淬火和回火	效率低, 劳动强度大, 但用于单件生产方便	
气体法	发生炉气体法	把天然气、丙、丁烷按一定比例和空气混合, 在 950 ~ 1000℃ 和 Ni 催化剂作用下, 裂解成吸热式气: $\text{CH}_4 + 2.38 \text{ 空气} \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2 + 1.88\text{N}_2$, 把吸热式气和甲烷(或丙烷)通入 900 ~ 950℃ 的密封炉中施行渗碳)	用吸热式气作载气, 甲烷或丙烷作渗碳气	工件在炉中冷至淬火温度, 然后在密封条件下淬火, 出炉后清洗和低温回火	效率高, 生产成本低, 质量稳定, 但制备过程较复杂, 设备庞大, 耗能多、受气源供应限制, 适合于汽车、拖拉机、轴承零件的大批量生产
	炉内滴注法	把含碳有机液体直接滴入炉内, 使其在 900 ~ 930℃ 的渗碳温度裂解, 并使工件表面渗碳	用甲醇裂解气作为载气, 以丙酮、乙酸乙酯或煤油裂解气作为渗碳气	在井式炉中渗碳后, 工件随罐吊装到冷却坑中, 冷到室温, 取出重新在保护气氛中加热淬火、回火。在密封箱式炉中渗碳后降温至淬火温度直接淬火和随后回火	液体滴剂用量大, 生产成本比发生炉气体法高。在井式炉中渗碳后直接出炉淬火, 工件会氧化和脱碳, 对随后不加工零件的质量有显著影响
	氮基合成气体法	用纯氮和甲醇裂解气以 1:1 的比例混合通入渗碳炉。此时可获得相当于吸热式气的成分。渗碳时按要求添加适量的甲烷或丙烷。炉气碳势用氧探头控制	纯氮(或工业氮)和甲醇裂解气($\text{H}_2 + \text{CO}$)混合, 再添 加甲烷或丙烷	在密封渗碳炉和推杆式炉中可降温直接淬火。在井式炉中渗碳后, 炉罐吊至冷却坑中冷至室温, 然后重新在保护气氛下加热淬火, 最后低温回火	液体滴剂用量大, 生产成本比发生炉气体法高。在井式炉中渗碳后直接出炉淬火, 工件会氧化和脱碳, 对随后不加工使用零件的质量有显著影响
	低压渗碳	一般在冷壁式真空炉中进行。工件入炉后, 抽空到 133Pa 开始加热, 继续抽空 0.13Pa, 加热到 950 ~ 1050℃, 周期性地通入甲烷或丙烷到 4000 ~ 6500Pa	甲烷或丙烷, 炉压 4000 ~ 4500Pa	工件渗碳后在氮保护下冷到室温, 重新加热淬火或冷到 A_{r1} 以下重新加热到淬火温度淬火, 然后回火。较高温度回火时可用真空回火炉	允许施行高温(1050℃)渗碳, 渗速大, 表面无黑色组织, 用剂少、劳动条件好。设备较昂贵, 有时难以避免炭黑, 渗层不易均匀

表 12-2 渗碳件常用热处理工艺及适用范围

热处理工艺	组织及性能特点	适用范围
1. 直接淬火低温回火 	不能细化钢的晶粒。工件淬火变形较大, 合金钢渗碳件表面残留奥氏体量较多, 表面硬度较低	操作简单, 成本低廉用来处理对变形和承受冲击载荷不大的零件, 适用于气体渗碳和液体渗碳工艺

(续)

热处理工艺	组织及性能特点	适用范围
<p>2. 预冷直接淬火, 低温回火 淬火温度 $800 \sim 850^{\circ}\text{C}$</p> 	可以减少工件淬火变形, 渗碳层中残余奥氏体量也可稍有降低, 表面硬度略有提高, 但奥氏体晶粒没有变化	操作简单, 工件氧化, 脱碳及淬火变形均较小。广泛用于细晶粒钢制造的各种工件
<p>3. 一次加热淬火, 低温回火 渗碳温度 $820 \sim 850^{\circ}\text{C}$ 或 $780 \sim 810^{\circ}\text{C}$</p> 	对心部强度要求高者, 采用 $820 \sim 850^{\circ}\text{C}$ 淬火, 心部组织为低碳马氏体; 表面要求硬度高者, 采用 $780 \sim 810^{\circ}\text{C}$ 加热淬火可以细化晶粒	适用于固体渗碳后的碳钢和低合金钢工件。气体、液体渗碳质的粗晶粒钢, 某些渗碳后不宜直接淬火的工件及渗碳后需机械加工的零件
<p>4. 渗碳、高温回火, 一次加热淬火, 低温回火 渗碳温度 $840 \sim 860^{\circ}\text{C}$</p> 	高温回火使马氏体和残留奥氏体分解, 渗层中碳和合金元素以碳化物形式析出, 便于切削加工及淬火后渗层残留奥氏体减少	主要用于 Cr-Ni 合金钢渗碳工件
<p>5. 二次淬火低温回火</p> 	第一次淬火 (或正火), 可以消除渗层网状碳化物及细化心部组织。第二次淬火主要改善渗层组织但对心部性能要求较高时, 应在心部 Ac_3 以上淬火	主要用于对力学性能要求很高的重要渗碳工件, 特别是对粗晶粒钢。但在渗碳后需进行两次高温加热, 使工件变形及氧化脱碳增加, 热处理过程较复杂

(续)

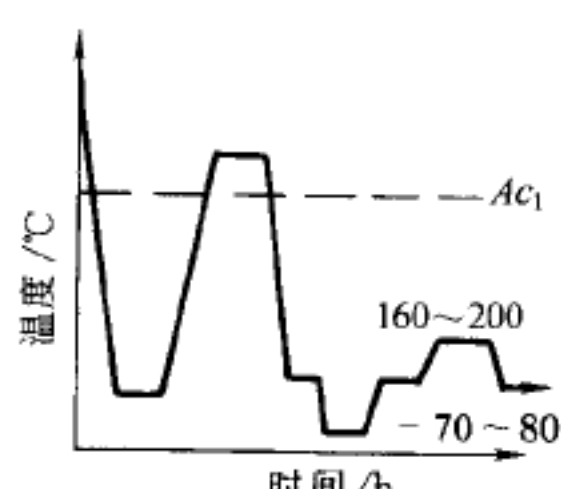
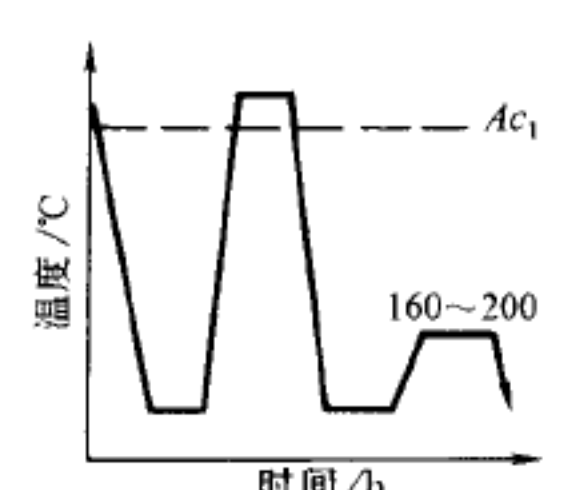
热处理工艺	组织及性能特点	适用范围
6. 二次淬火冷处理低温回火 	高于 Ac_1 或 Ac_3 (心部) 的温度淬火, 高合金钢表层残留奥氏体较多, 经冷处理 ($-70 \sim -80^\circ\text{C}$) 促使奥氏体转变, 从而提高表面硬度和耐磨性	主要用于渗碳后不需要机械加工的高合金钢工件
7. 渗碳后感应加热淬火低温回火 	可以细化渗层及靠近渗层处的组织。淬火变形小, 不允许硬化的部位 (如齿轮轴孔, 轮辐上的螺纹孔等) 不需预先防渗	各种齿轮及轴类件

表 12-3 几种有机液体的产气量

(单位: L/mL)

液体名称	产气量	液体名称	产气量	液体名称	产气量
苯	0.42	甲 醇	1.66	丙 酮	1.23
煤 油	0.73	焦 苯	0.58	乙 醇	1.55

表 12-4 常用有机液体的渗碳特性

名 称	分 子 式	碳当量/g	碳氧比	渗 碳 反 应 式	用 途
甲醇	CH_3OH	—	1	$\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$	稀释剂
乙醇	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	46	2	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} \rightarrow [\text{C}] + \text{CO} + 3\text{H}_2$	渗碳剂
异丙醇	$\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$	30	3	$\text{C}_3\text{H}_7\text{OH} \rightarrow 2[\text{C}] + \text{CO} + 4\text{H}_2$	强渗碳剂
乙醚	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OC}_2\text{H}_5$	24.7	4	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OC}_2\text{H}_5 \rightarrow 3[\text{C}] + \text{CO} + 5\text{H}_2$	强渗碳剂
丙酮	CH_3COCH_3	29	3	$\text{CH}_3\text{COCH}_3 \rightarrow 2[\text{C}] + \text{CO} + 3\text{H}_2$	强渗碳剂
乙酸乙酯	$\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$	44	2	$\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5 \rightarrow 2[\text{C}] + 2\text{CO} + 4\text{H}_2$	渗碳剂
煤油	航空煤油、灯用煤油主要成分为: $\text{C}_9 \sim \text{C}_{14}$ 和 $\text{C}_{11} \sim \text{C}_{17}$ 的烷烃	—		850°C 以下裂解不充分, 含大量烯烃 (乙烯、丙烯), 容易产生炭黑和结焦。应在 $900 \sim 950^\circ\text{C}$ 使用, 高温下理论分解式为 $n_1 (\text{C}_{11}\text{H}_{24} \sim \text{C}_{17}\text{H}_{36}) \rightarrow n_2\text{CH}_4 + n_2[\text{C}] + n_3\text{H}_2$	强渗碳剂

表 12-5 常用有机溶剂在不同温度下的分解产物

名称	温度/℃	分解产物的成分 (%)					
		CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C _m H _n	O ₂ + N ₂
甲醇	950	0.2	32.4	66.2	0.60	0.60	
	850	0.6	31.4	64.8	1.74	1.44	
	750	1.8	29.5	61.4	3.37	3.93	
乙醇	950	1.0	30.7	53.7	11.7	0.30	
	850	1.5	29.3	49.3	13.6	0.70	
	750	1.7	26.2	49.8	14.2	0.90	
异丙醇	950	0.8	28.2	47.8	18.5	3.2	
	850	1.0	24.5	44.3	20.8	7.3	
	750	1.5	21.6	40.5	22.6	8.8	
醋酸甲酯	950	1.5	46.6	38.2	10.3	0.3	
	850	2.5	41.3	35.2	13.3	0.4	
	750	3.1	40.5	33.8	14.2	0.6	
煤油	925	0.4 ~ 2.2	1.2 ~ 4.6	37 ~ 46	40 ~ 56	1 ~ 2	0.4 ~ 0.8
	800	0.4 ~ 1.2	0.2 ~ 1.8	19 ~ 26	38.4 ~ 47.3	20 ~ 29	0.4 ~ 7.3
苯	925	1.4	15.9	62.1	10.3	1.2	8.1

表 12-6 甲醇—丙酮混合液裂解气的碳势

项 目	甲 醇 : 丙 酮		
	50:50	55:45	60:40
裂化压力/Pa	2548 ~ 2744	2546 ~ 2744	2548 ~ 2744
气体流量/m ³ ·h ⁻¹	1.6 ~ 1.8	1.6 ~ 1.8	1.6 ~ 1.8
碳 势	1.34	1.26	1.18

表 12-7 几种吸热式气氛组成

原料气	混 合 比 空气:原料气	气氛组成 (体积分数) (%)						
		CO ₂	O ₂	H ₂ O	CH ₄	CO	H ₂	N ₂
天 然 气	2.5	0.3	0	0.6	0.4	20.9	40.7	余量
城市煤气	0.4 ~ 0.6	0.2	0	0.12	0 ~ 1.5	25 ~ 27	41 ~ 48	余量
丙 烷	7.2	0.3	0	0.6	0.4	24.0	33.4	余量
丁 烷	9.6	0.3	0	0.6	0.4	24.2	30.3	余量

表 12-8 几种氮基渗碳气氛的成分

序号	原 料 气	炉气成分 (体积分数) (%)					碳势 (%)	备注
		CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	N		
1	甲醇 + 氮 + 碳氢化合物	0.4	15 ~ 20	0.3	15 ~ 20	余量		Endomix 法
2	N ₂ + ($\frac{\text{CH}_4}{\text{空气}} = 0.7$)	—	11.6	6.9	32.1	49.4	0.83	
3	N ₂ + ($\frac{\text{CH}_4}{\text{CO}_2} = 6.0$)	—	4.3	2.0	18.3	75.4	1.0	NCC 法
4	N ₂ + C ₃ H ₈ (或 CH ₄)	0.024 0.01	0.4 0.1	15				渗碳 扩散

表 12-9 几种滴注剂单参数控制的最大碳势偏差^①

渗碳方法	露点控制		CO ₂ 控制	
	工作范围 ^③ ($w_c\%$)	全范围 ($w_c\%$)	工作范围 ($w_c\%$)	全范围 ^④ ($w_c\%$)
甲醇—醋酸乙酯	± 0.035	± 0.055	$\pm 0.055^{②}$	$\pm 0.08^{②}$
甲醇—75%丙酮—25% 醋酸乙酯	± 0.045	± 0.075	± 0.05	$\pm 0.08^{②}$
甲醇—丙酮	± 0.065	± 0.105	± 0.065	± 0.10

① 由于基础成分的变化, 使在 920℃, 给定碳势为 $w_c 1\%$ 的条件下引起的可能碳势最大偏差。

② 建议实际生产中不用 CO₂ 控制。

③ 工作范围——指渗碳剂含量在 15% ~ 90% 的范围内变化。

④ 全范围——指在 0 ~ 100% 渗碳剂的整个变动范围。

表 12-10 采用甲醇、煤油滴注式渗碳时的渗碳剂用量

设备型号及规格	赶气保温		渗 碳		扩散降温	
	甲醇 /滴·min ⁻¹	煤油 /滴·min ⁻¹	甲醇 /滴·min ⁻¹	煤油 /滴·min ⁻¹	甲醇 /滴·min ⁻¹	煤油 /滴·min ⁻¹
RJJ—75—9T	200	30 ~ 60	30 ~ 60	120 ~ 140	30 ~ 60	100 ~ 120
RJJ—90—9T	220	35 ~ 65	35 ~ 65	160 ~ 180	35 ~ 65	140 ~ 160
RJJ—105—9T	300	50 ~ 80	50 ~ 80	200 ~ 220	50 ~ 80	180 ~ 200

注: 880℃ 渗碳时 w_{CO_2} 为 0.46% ~ 0.52%; 930℃ 渗碳, w_{CO_2} 为 0.11% ~ 0.15%。

表 12-11 采用煤油加空气滴注式渗碳时的渗碳剂用量

设备型号及规格	赶 气		保 温		控制碳势	
	氮气 /m ³ ·h ⁻¹	煤油 /滴·min ⁻¹	氮气 /m ³ ·h ⁻¹	煤油 /滴·min ⁻¹	空气 /m ³ ·h ⁻¹	煤油 /滴·min ⁻¹
RJJ—60—9T (880℃ 渗碳)	0.12	40	0.12	50	0.10	25 ~ 30
RJJ—60—9T (930℃ 渗碳)	0.12	40	0.12	50	0.10	25 ~ 30

表 12-12 碳势与 CO₂、CH₄ 的相关关系

代用特性	回 归 式	相关系数	标准误差
CO ₂	碳势 = 1.694 - 4.448CO ₂	0.886	0.100
CH ₄	碳势 = 0.284 + 0.854CH ₄	0.957	0.062
CO ₂ 、CH ₄	碳势 = 0.673 - 1.355CO ₂ + 0.651CH ₄	0.965	0.057

表 12-13 强渗时间、扩散时间及渗碳层深度

要求的渗层 深度/mm	不同温度下的强渗时间			强渗后的渗层 深度/mm	扩散时间 /h	扩散后的渗层 深度/mm
	(920 ± 10)℃	(930 ± 10)℃	(940 ± 10)℃			
0.4 ~ 0.7	40min	30min	20min	0.20 ~ 0.25	约 1	0.5 ~ 0.6
0.6 ~ 0.9	1.5h	1.0h	30min	0.35 ~ 0.40	约 1.5	0.7 ~ 0.8

(续)

要求的渗层 深度/mm	不同温度下的强渗时间			强渗后的渗层 深度/mm	扩散时间 /h	扩散后的渗层 深度/mm
	(920 ± 10) °C	(930 ± 10) °C	(940 ± 10) °C			
0.8 ~ 1.2	2h	1.5h	1h	0.45 ~ 0.55	约 2	0.9 ~ 1.0
1.1 ~ 1.6	2.5h	2h	1.5h	0.60 ~ 0.70	约 3	1.2 ~ 1.3

注：若渗碳后直接降温淬火，则扩散时间应包括降温及降温后停留的时间。

表 12-14 三个常用温度下不同渗碳时间所对应的渗碳层深度 (单位：mm)

渗碳温度 /°C	渗 碳 时 间 /h								
	2	4	8	12	16	20	24	30	36
870	0.64	0.89	1.27	1.55	1.80	2.01	2.18	2.46	2.74
900	0.76	1.07	1.52	1.85	2.13	2.39	2.62	2.95	3.20
925	0.89	1.27	1.80	2.21	2.54	2.84	3.10	3.48	3.81

表 12-15 液体渗碳盐浴组成和使用效果

序号	盐浴组成 (质量分数%)			主要化学反应	使用效果																																			
	组成物	新盐成分	盐浴控制成分																																					
1	NaCN BaCl NaCl	4 ~ 6 80 14 ~ 16	0.9 ~ 1.5 68 ~ 74 —	$2\text{NaCN} + \text{BaCl}_2 \rightarrow 2\text{NaCl} + \text{Ba}(\text{CN})_2$; $\text{Ba}(\text{CN})_2 \rightarrow \text{BaCN}_2 + [\text{C}]$	与其他盐浴相比, 本盐浴较易控制, 渗碳工件表面碳含量稳定。例: 20Cr-MnTi、20Cr 钢, 920℃ 渗碳 3.5 ~ 4.5h, 表面最高碳浓度 0.83% ~ 0.87%																																			
2	603 渗碳剂 ^① KCl NaCl Na ₂ CO ₃	10 40 ~ 45 35 ~ 40 10	2 ~ 8 (碳) 40 ~ 45 35 ~ 40 2 ~ 8	1. $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{C} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + 2\text{CO}$ $2\text{CO} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + [\text{C}]$ 2. $3(\text{NH}_2)_2\text{CO} + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow 2\text{NaCNO} + 4\text{NH}_3 + 2\text{CO}_2$ $4\text{NaCNO} \rightarrow 2\text{NaCN} + \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CO} + 2[\text{N}]$ (盐浴中 NaCN 为 0.5% ~ 0.9%)	该盐浴原料无毒, 在 920 ~ 940℃ 时, 装炉量为盐浴总量的 50% ~ 70%, 20 钢渗碳试样的渗碳速度为: <table><tr><td>保温时间 (h)</td><td>渗层深度 (mm)</td></tr><tr><td>1</td><td>> 0.5</td></tr><tr><td>2</td><td>> 0.7</td></tr><tr><td>3</td><td>> 0.9</td></tr></table>	保温时间 (h)	渗层深度 (mm)	1	> 0.5	2	> 0.7	3	> 0.9																											
保温时间 (h)	渗层深度 (mm)																																							
1	> 0.5																																							
2	> 0.7																																							
3	> 0.9																																							
3	渗碳剂 ^② NaCl KCl Na ₂ CO ₃	10 40 40 10	5 ~ 8 (碳) 40 ~ 50 33 ~ 43 5 ~ 10	$\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{C} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + 2\text{CO}$ $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + [\text{C}]$	<table><tr><td colspan="4">920 ~ 940℃ 时渗碳速度如下:</td></tr><tr><td rowspan="2">渗碳时间 /h</td><td colspan="3">渗碳层深度/mm</td></tr><tr><td>20</td><td>20Cr</td><td>20CrMnTi</td></tr><tr><td>1</td><td>0.3 ~ 0.4</td><td>0.55 ~ 0.65</td><td>0.55 ~ 0.65</td></tr><tr><td>2</td><td>0.7 ~ 0.75</td><td>0.9 ~ 1.0</td><td>1.0 ~ 1.10</td></tr><tr><td>3</td><td>1.0 ~ 1.10</td><td>1.4 ~ 1.5</td><td>1.42 ~ 1.52</td></tr><tr><td>4</td><td>1.28 ~ 1.34</td><td>1.56 ~ 1.62</td><td>1.56 ~ 1.64</td></tr><tr><td>5</td><td>1.40 ~ 1.50</td><td>1.80 ~ 1.90</td><td>1.80 ~ 1.90</td></tr><tr><td colspan="4">表面碳浓度 0.9% ~ 1.0%</td></tr></table>	920 ~ 940℃ 时渗碳速度如下:				渗碳时间 /h	渗碳层深度/mm			20	20Cr	20CrMnTi	1	0.3 ~ 0.4	0.55 ~ 0.65	0.55 ~ 0.65	2	0.7 ~ 0.75	0.9 ~ 1.0	1.0 ~ 1.10	3	1.0 ~ 1.10	1.4 ~ 1.5	1.42 ~ 1.52	4	1.28 ~ 1.34	1.56 ~ 1.62	1.56 ~ 1.64	5	1.40 ~ 1.50	1.80 ~ 1.90	1.80 ~ 1.90	表面碳浓度 0.9% ~ 1.0%			
920 ~ 940℃ 时渗碳速度如下:																																								
渗碳时间 /h	渗碳层深度/mm																																							
	20	20Cr	20CrMnTi																																					
1	0.3 ~ 0.4	0.55 ~ 0.65	0.55 ~ 0.65																																					
2	0.7 ~ 0.75	0.9 ~ 1.0	1.0 ~ 1.10																																					
3	1.0 ~ 1.10	1.4 ~ 1.5	1.42 ~ 1.52																																					
4	1.28 ~ 1.34	1.56 ~ 1.62	1.56 ~ 1.64																																					
5	1.40 ~ 1.50	1.80 ~ 1.90	1.80 ~ 1.90																																					
表面碳浓度 0.9% ~ 1.0%																																								

(续)

序号	盐浴组成 (质量分数%)			主要化学反应	使用效果
	组成物	新盐成分	盐浴控制成分		
4	Na ₂ CO ₃ NaCl SiC (粒度 0.700 ~ 0.355mm)	78% ~ 85% 10% ~ 15% 6% ~ 8%		$2\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{SiC} \rightarrow \text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{Na}_2\text{O} + 2\text{CO} + [\text{C}]$	880 ~ 900℃ 渗碳 30min, 总层深 0.15 ~ 0.20mm, 共析层 0.07 ~ 0.10mm 硬度 72 ~ 78HRA

① 603 渗碳剂组成为 NaCl 5%, KCl 10%, Na₂CO₃ 15%, (NH₂)₂CO 20%, 木炭粉 (0.154mm) 5%。

② 渗碳剂组成为: 木炭粉 [0.280 ~ 0.154mm (60 ~ 100 目)] 70%; NaCl 30%。

表 12-16 20CrMnTi、20 钢、20Cr 液体渗碳层深度^①

渗碳时间/h	渗碳层深度 (920 ~ 940℃) /mm ^②		
	18CrMnTi	20 钢	20Cr
1	0.55 ~ 0.65	0.30 ~ 0.40	0.55 ~ 0.65
2	1.00 ~ 1.10	0.70 ~ 0.75	0.90 ~ 1.00
3	1.42 ~ 1.52	1.00 ~ 1.10	1.40 ~ 1.50
4	1.56 ~ 1.64	1.28 ~ 1.34	1.56 ~ 1.62
5	1.80 ~ 1.90	1.40 ~ 1.50	1.80 ~ 1.90

① 无毒盐浴配方: 渗碳剂 (含 0.280 ~ 0.154mm, 木炭粉 70%, 30% NaCl): 10 份; K₂CO₃: 40 份; KCl: 40 份; Na₂CO₃: 10 份。

② 表面碳浓度为 $w_c 0.90\% \sim 1.00\%$ 。

表 12-17 常用固体渗碳剂组成

组分名称	含量 (质量分数) (%)	使用情况
BaCO ₃ CaCO ₃ 木炭 (白桦木)	20 ~ 25 3.5 ~ 5 余量	在 930 ~ 950℃, 渗碳时间 4 ~ 15h, 渗层厚度 0.5 ~ 1.5mm
BaCO ₃ CaCO ₃ 煤的半焦炭	10 ~ 15 3.5 余量	工作混合物由 25% ~ 30% 新渗碳剂和 75% 旧渗碳剂组成。工作物中含 BaCO ₃ 5% ~ 7%
BaCO ₃ 木炭	3 ~ 5 余量	1. 20CrMnTi, 930℃ 渗碳 7h 层深 1.33mm, 表面浓度 $w_c 1.07\%$ 2. 用于低合金钢时, 新旧渗碳剂比为 1:3; 用于低碳钢, BaCO ₃ 应增至 15%
BaCO ₃ CaCO ₃ 木炭	15 5 余量	新旧渗剂比为 3:7, 920℃ 渗碳层深 1.0 ~ 1.5mm; 平均渗碳速度 0.11mm/h, 表面碳浓度 $w_c = 1.0\%$
BaCO ₃ Na ₂ CO ₃ 木炭	3 ~ 4 0.3 ~ 1.0 余量	18Cr2Ni4WA 及 20Cr2Ni4A, 层深 1.3 ~ 1.9mm 时, 表面碳浓度为 $w_c 1.2\% \sim 1.5\%$ 。用于 12CrNi3 钢时 BaCO ₃ 需增至 5% ~ 8%

(续)

组分名称	含量 (质量分数) (%)	使用 情 况
BaCO ₃	10	新旧渗剂的比例为 1:1, 20CrMnTi 钢汽轮机被动齿轮, ($\phi 561$, $m=5$) 在 900℃ 渗碳 12~15h 磨齿后层深达 0.8~1.0mm
Na ₂ CO ₃	3	
CaCO ₃	1	
木炭	余量	
黄血盐	10	低碳钢及低碳合金钢, 920℃ 保温 3~4h, 层深 1.2mm
Na ₂ CO ₃	10	
木炭	余量	
醋酸钠	10	由于含醋酸钠 (或醋酸钡), 渗碳活性较高, 速度较快, 但容易使表面碳浓度过高, 因含焦炭, 渗剂热强度高及抗烧损性能好
焦 炭	30~35	
木 炭	55~60	
重 油	2~3	

表 12-18 固体渗碳时间与渗层深度和箱子断面的关系

深度/mm 时间/h 箱子断面/mm	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0	1.0~1.2	1.2~1.4
200	3.5~5.0	5.0~5.5	5.5~6.5	6.5~7.5	7.5~9.5
250	4.5~6.5	5.5~6.0	6.0~7.0	7.0~8.5	8.5~11.5
300	5.0~6.5	6.0~6.5	6.5~7.5	7.5~9.0	9.0~11.5
350	5.5~6.0	6.5~7.0	7.0~8.0	9.0~10.0	9.5~12.0
400	6.0~6.5	7.0~8.0	8.0~9.0	9.5~11.0	10~13

注: 1. 保温时间按仪表到温计算。
2. 碳钢用 BaCO₃ 作催渗剂时取上限; 合金钢用 Na₂CO₃ 作催渗剂时取下限。

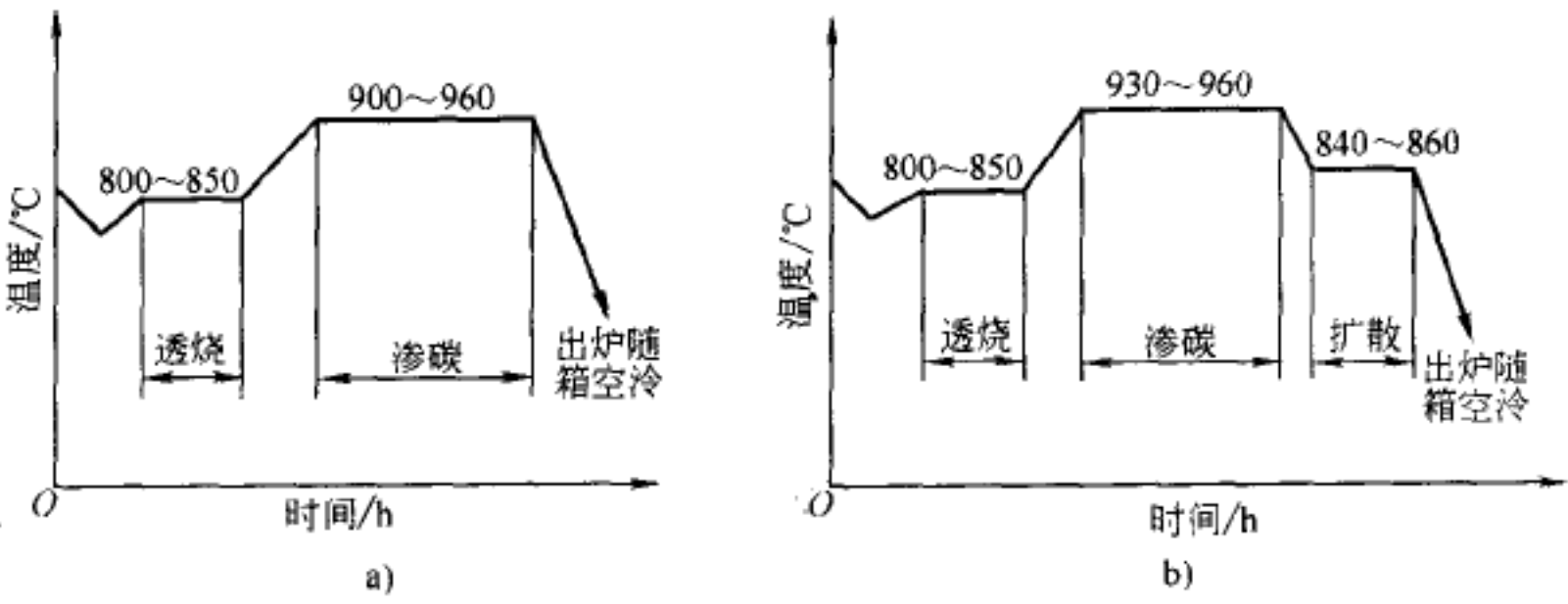


图 12-13 固体渗碳工艺
a) 普通工艺 b) 分级渗碳工艺

表 12-19 工件摆放间距

项目	保持间距/mm	项目	保持间距/mm
工件与箱底	30~40	工件与工件	10~15
工件与箱壁	20~30	工件与箱盖	40~50

表 12-20 固体渗碳透烧时间

渗碳箱尺寸 (直径×高)/mm	250×450	350×450	350×600	400×450
透烧时间/h	2.5~3	3.5~4	4~4.5	4.5~5

表 12-21 渗碳膏剂组成及使用效果

序号	膏剂组成 (质量分数) (%)	使用方法及效果										
1	炭粉 (0.154mm) 64 碳酸钠 6 醋酸钠 6 黄血盐 12 面粉 12	先将三种盐混合, 用少量水加热溶解, 然后加入炭粉。再用水把面粉调成糊状, 与前者混合, 使成渗碳膏。使用时敷于工件表面。低碳钢在 920℃ 渗碳 15min, 渗碳层深度 0.25 ~ 0.30mm, 淬火后表面硬度 56 ~ 62HRC										
2	炭黑粉 30 碳酸钠 3 醋酸钠 2 废机油 25 柴油 40	将所列原粉混合后, 形成胶状。在工件渗碳表面涂敷 2 ~ 3mm 厚的膏剂, 对于低碳钢, 在 920 ~ 940℃ 时的渗碳速度为 1 ~ 1.2mm/h										
3	炭 黑 55 碳酸钠 30 草酸钠 15	<p>渗碳温度为 950℃ 时不同渗碳时间所得渗层深度</p> <table><tr><td>保温时间/h</td><td>1.5</td><td>2.0</td><td>2.5</td><td>3.0</td></tr><tr><td>渗层深度/mm</td><td>0.6</td><td>0.8</td><td>0.9</td><td>1.0</td></tr></table> <p>表层碳浓度 w_C 1.0% ~ 1.2%, 淬火后硬度 60HRC</p>	保温时间/h	1.5	2.0	2.5	3.0	渗层深度/mm	0.6	0.8	0.9	1.0
保温时间/h	1.5	2.0	2.5	3.0								
渗层深度/mm	0.6	0.8	0.9	1.0								

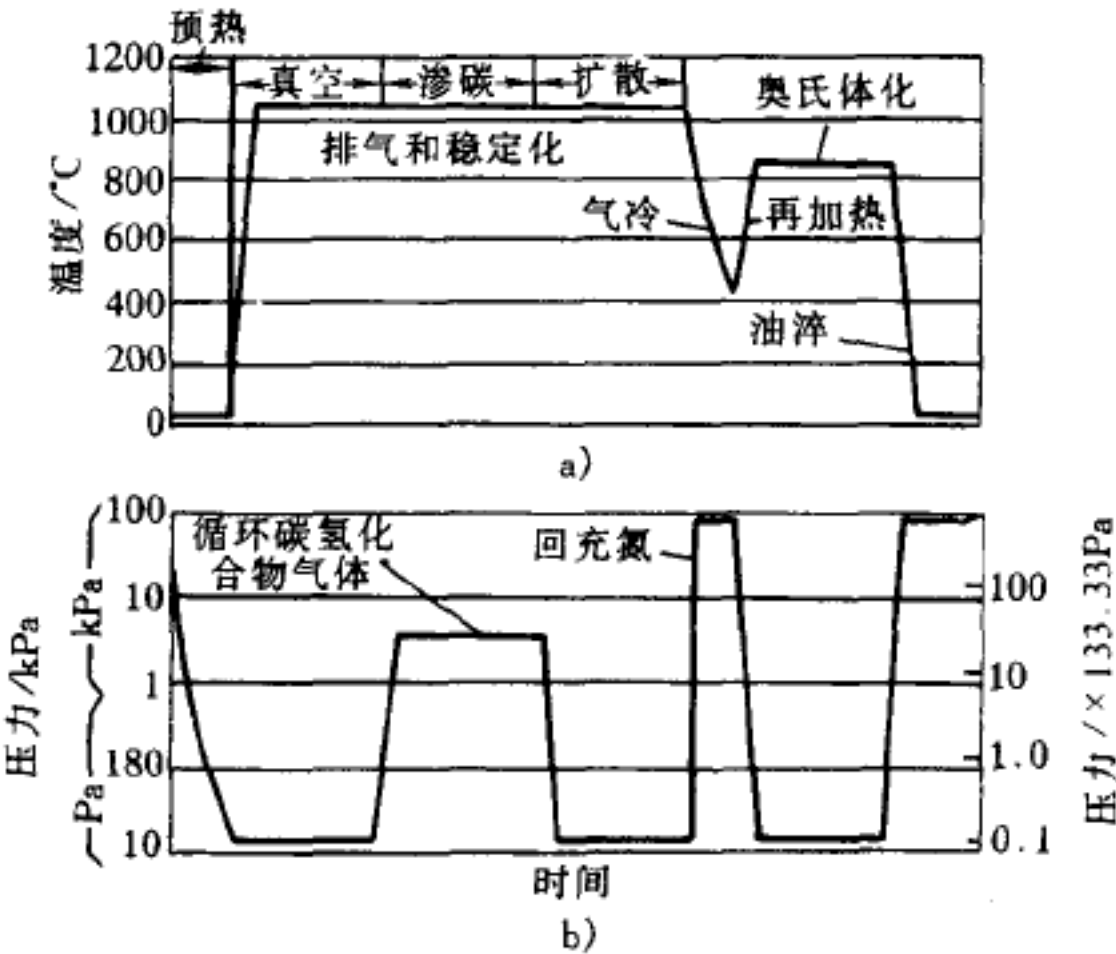


图 12-14 典型单周期真空渗碳
(没有重复渗碳与扩散步骤)
a) 温度变化 b) 压力变化

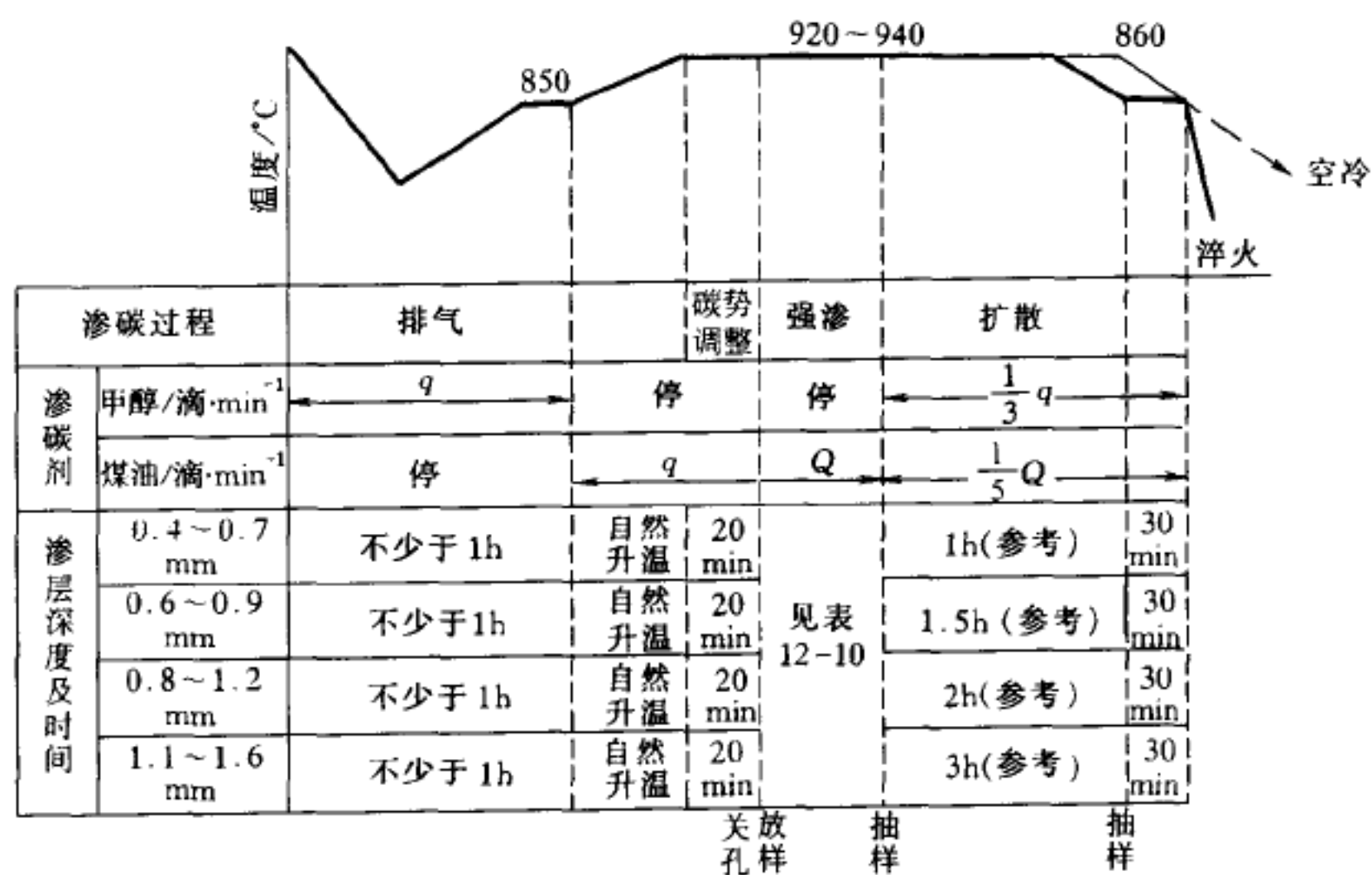


图 12-15 煤油—甲醇滴注式通用气体渗碳工艺

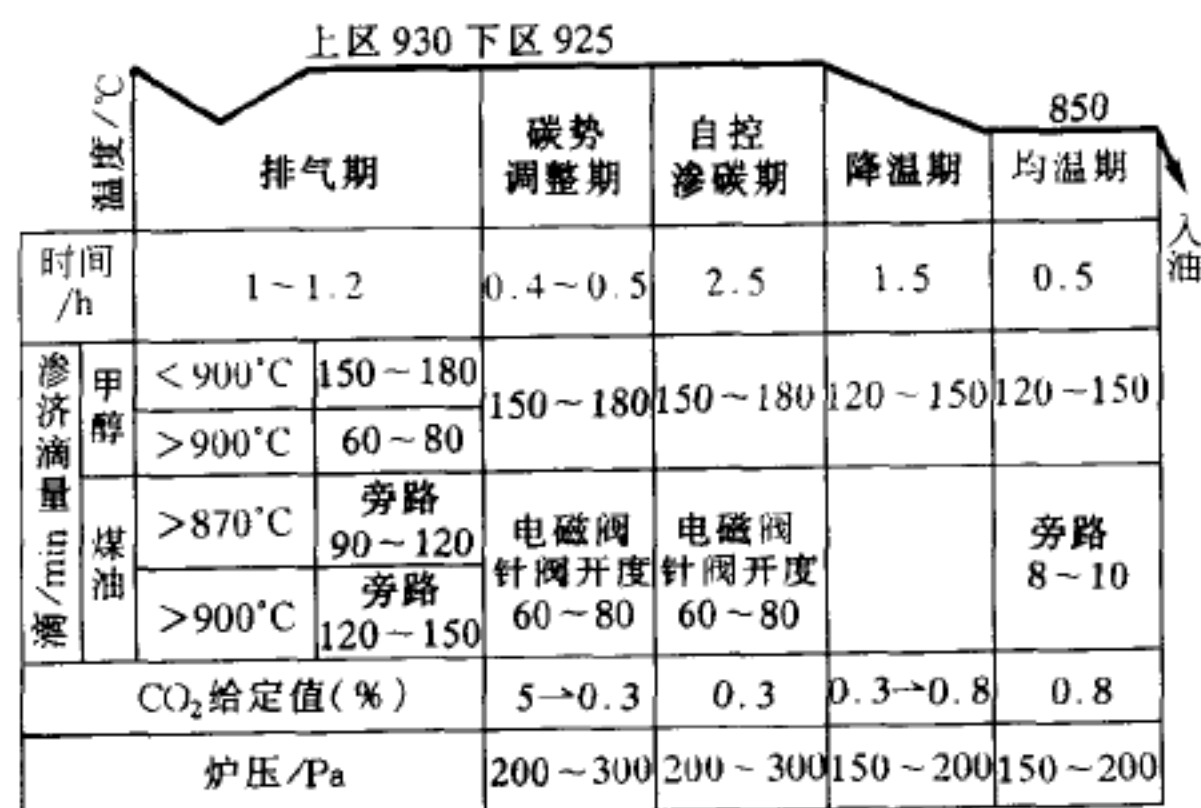
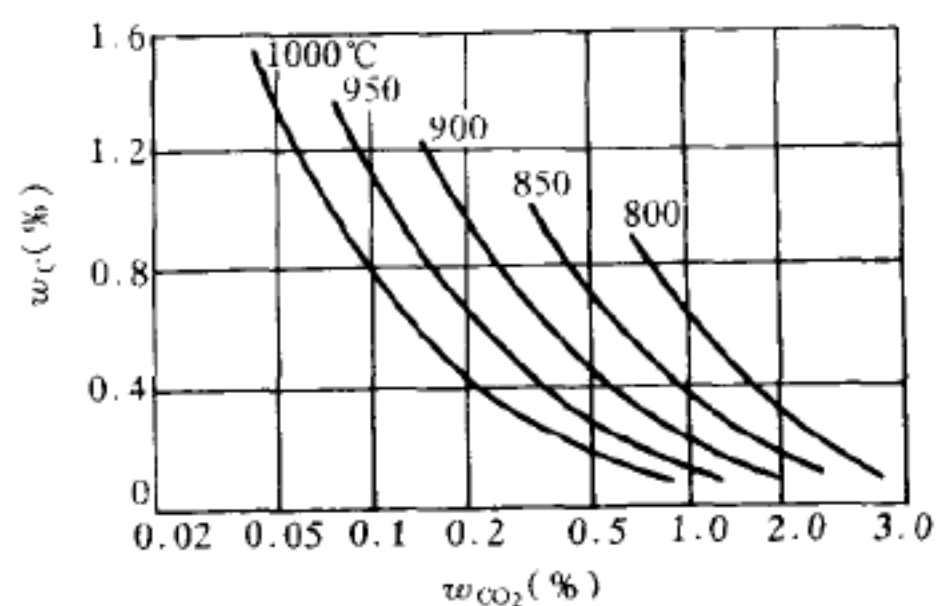
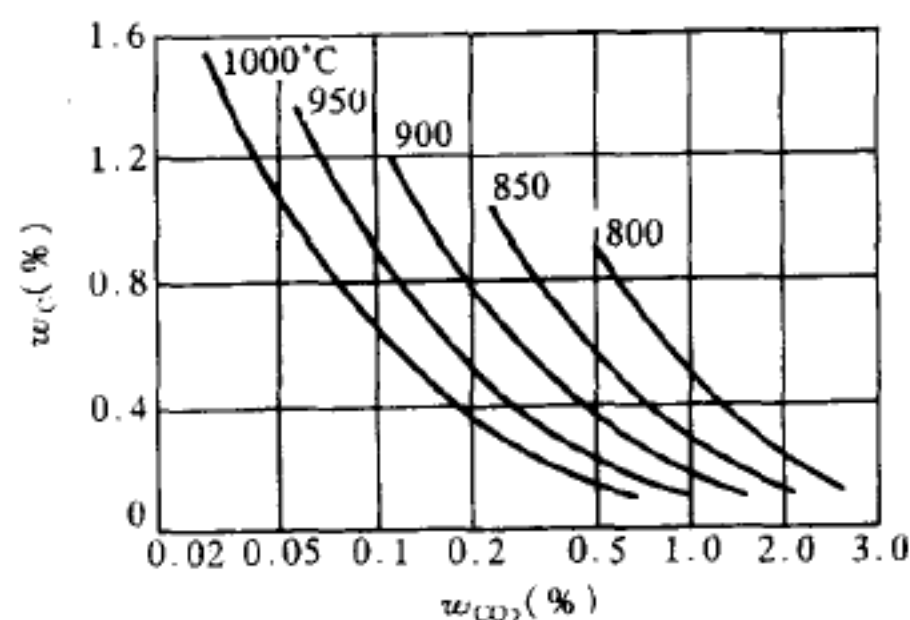


图 12-16 煤油—甲醇红外线滴控渗碳工艺

图 12-17 由甲烷制成的吸热气氛中
碳势与 CO₂ 含量之间的关系图 12-18 由丙烷制成的吸热式气氛中
碳势与 CO₂ 含量之间的关系

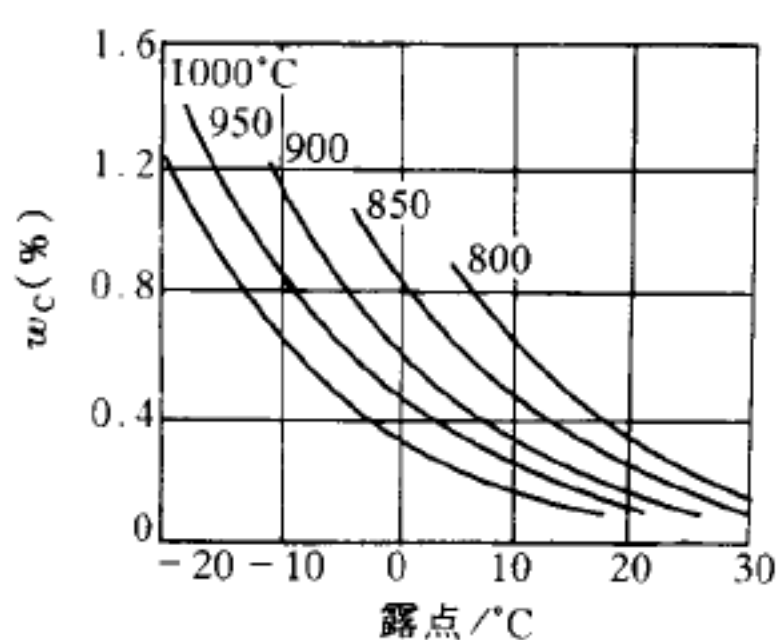


图 12-19 由甲烷制成的吸热式气氛中
碳势与露点间的关系

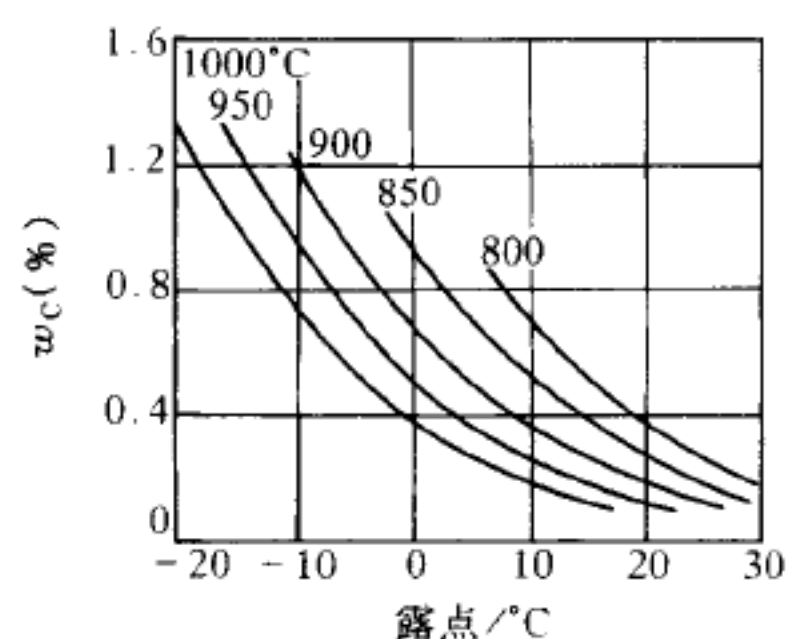


图 12-20 由丙烷制成的吸热式气氛中
碳势与露点间的关系

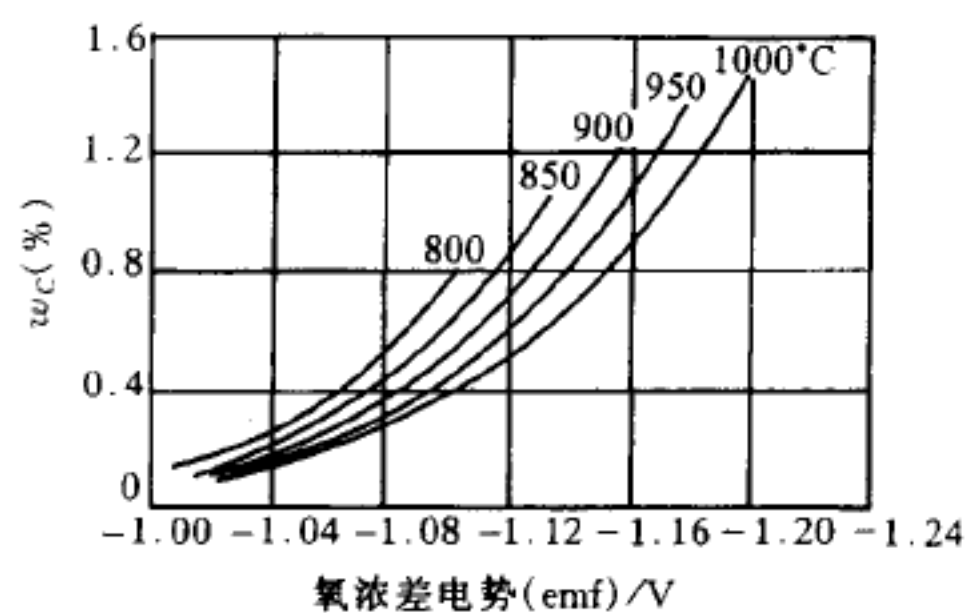


图 12-21 由甲烷制成的吸热式
气氛中炉气碳势与氧探头
输出电势之间的关系

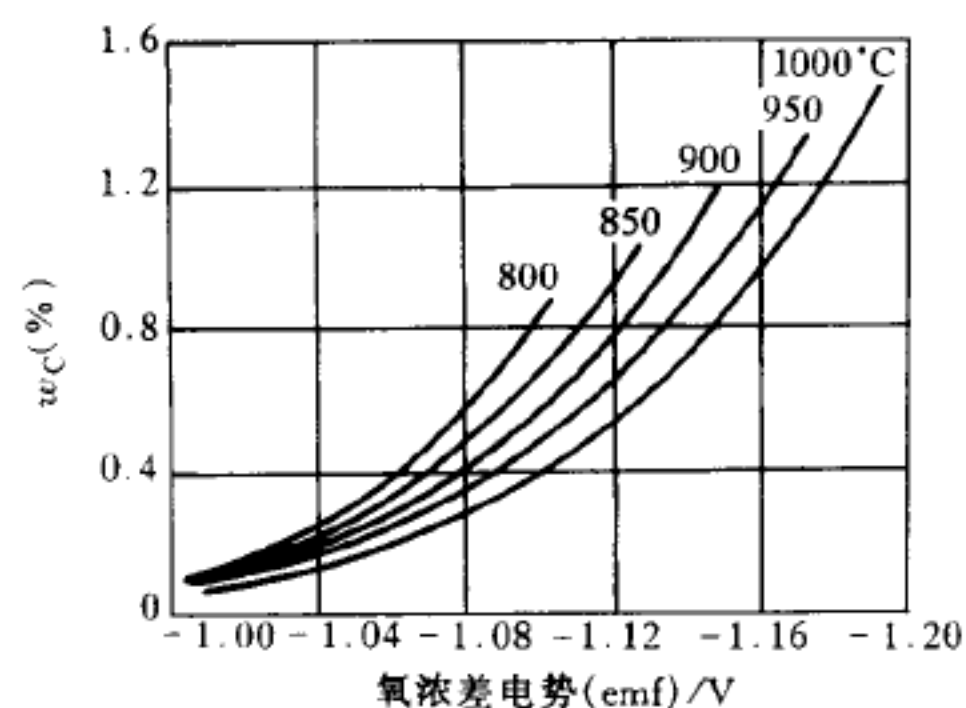


图 12-22 由丙烷制成的吸热式气氛中
炉气碳势与氧探头输出电势
之间的关系

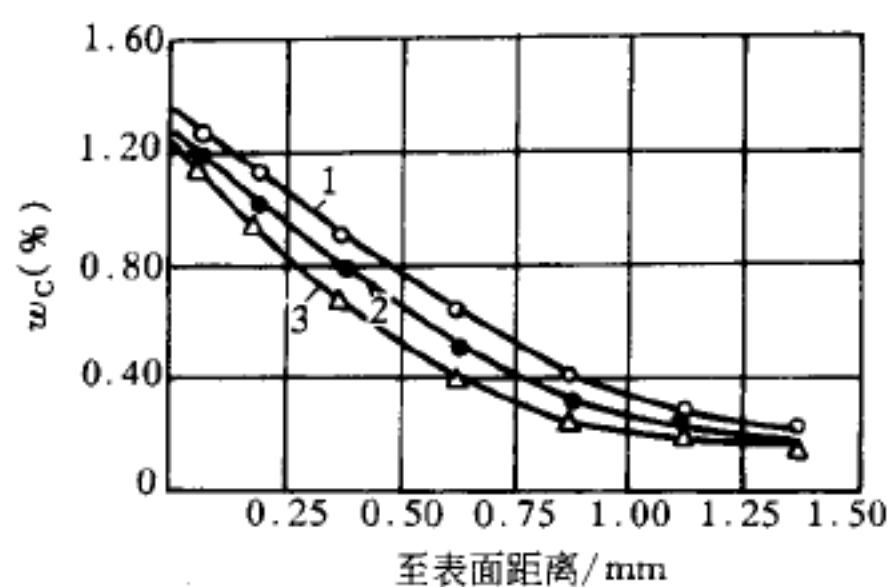


图 12-23 气体渗碳温度对碳浓度分布曲线
的影响 (箱式炉渗碳, 含甲烷 12%) 渗碳 4h
1—925°C 2—900°C 3—870°C

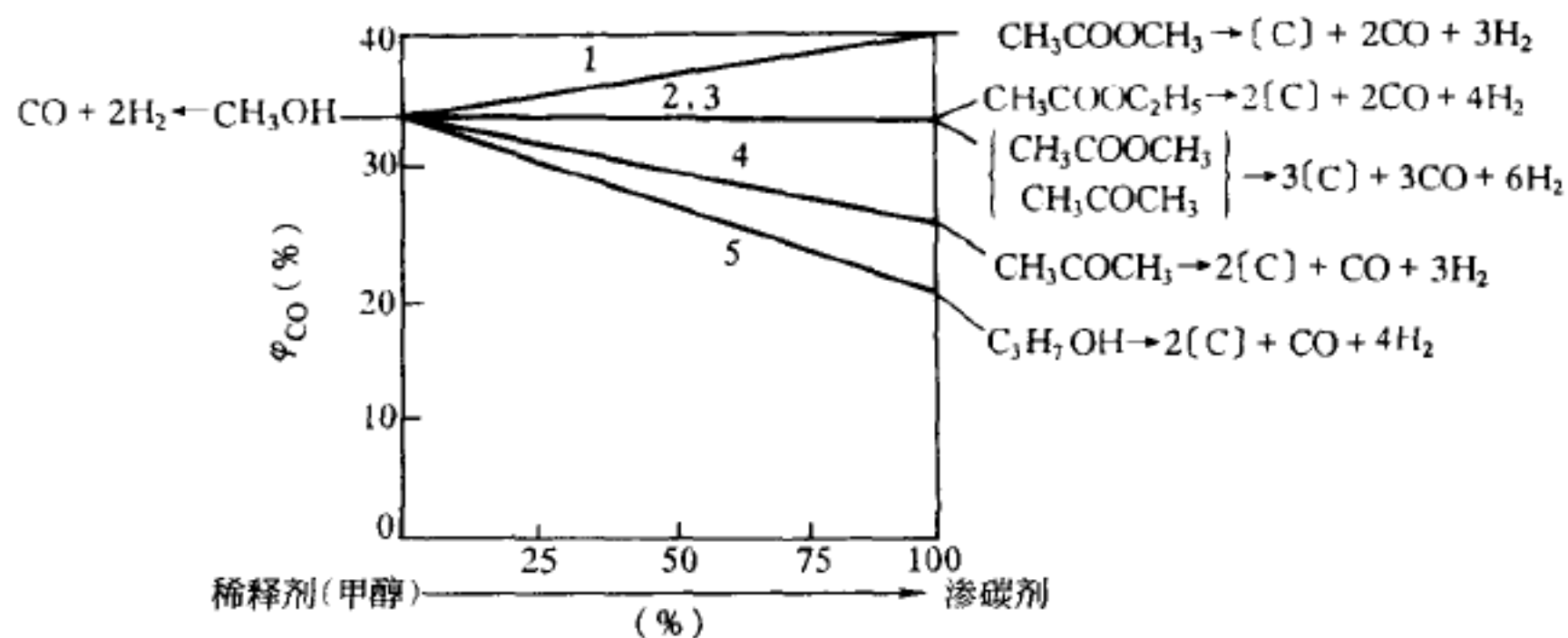


图 12-24 不同渗碳剂与甲醇按不同比例混合时 CO 含量的变化
(含量均为质量分数)

1—乙酸甲酯 2—乙酸乙酯 3—乙酸、甲酯+丙酮 4—丙酮 5—异丙醇

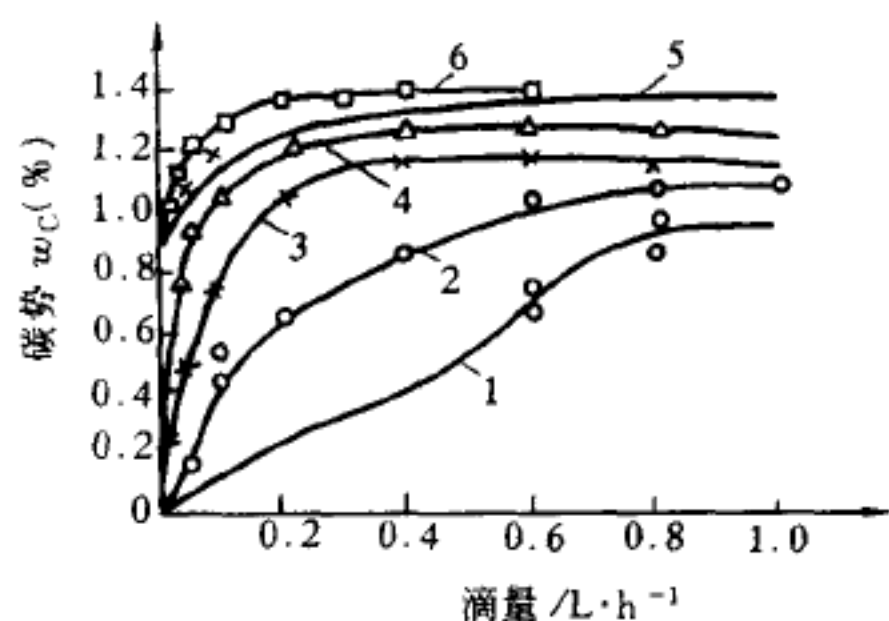


图 12-25 碳势与有机液体滴量的关系 (850℃)

1—C/O=1.0 2—C/O=1.2 3—C/O=1.4
4—C/O=1.6 5—C/O=2.0 6—C/O=2.23

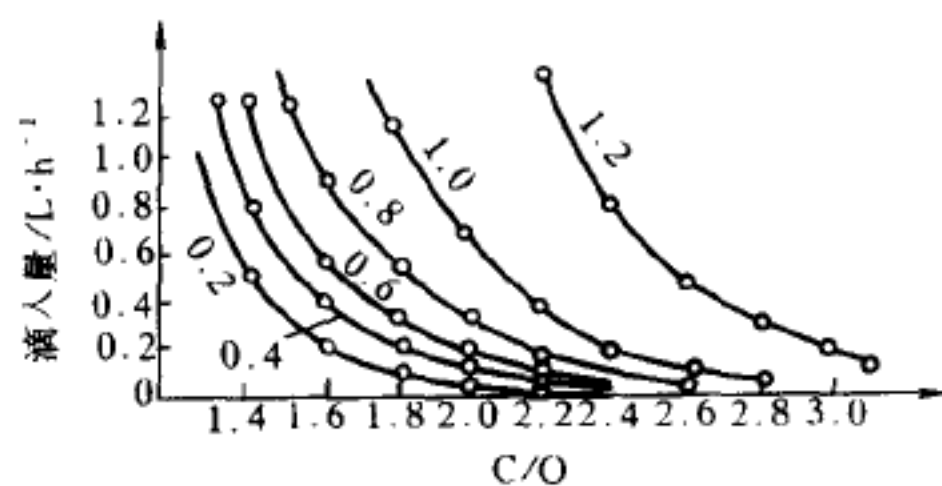


图 12-26 滴量与滴液组成 (C/O) 的关系
(试验温度 950℃, 图中数字为碳势)

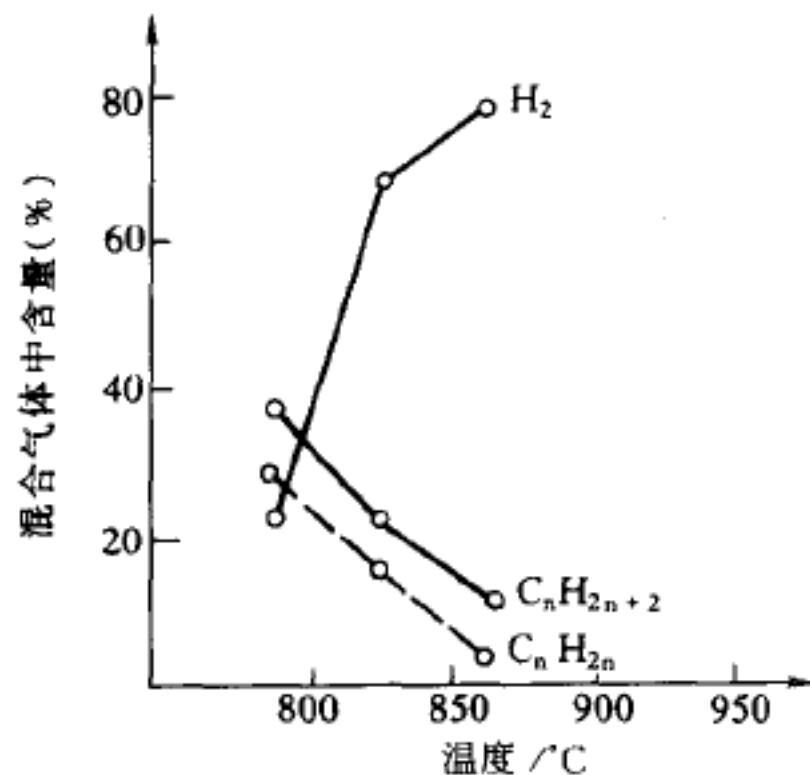


图 12-27 煤油热分解气成分与温度的关系

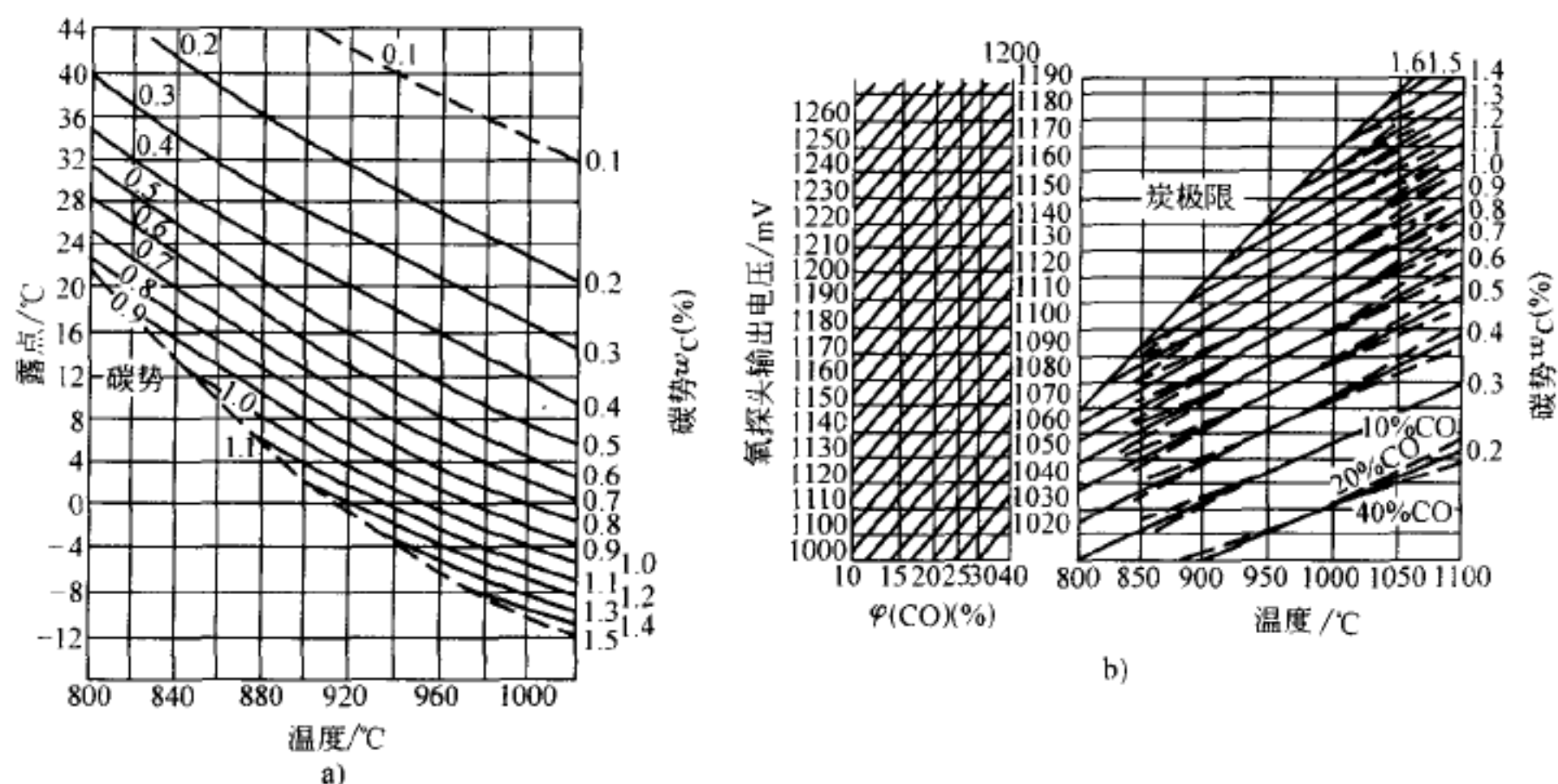


图 12-28 不同温度下甲醇—乙酸乙酯碳势与露点、氧探头输出值的关系

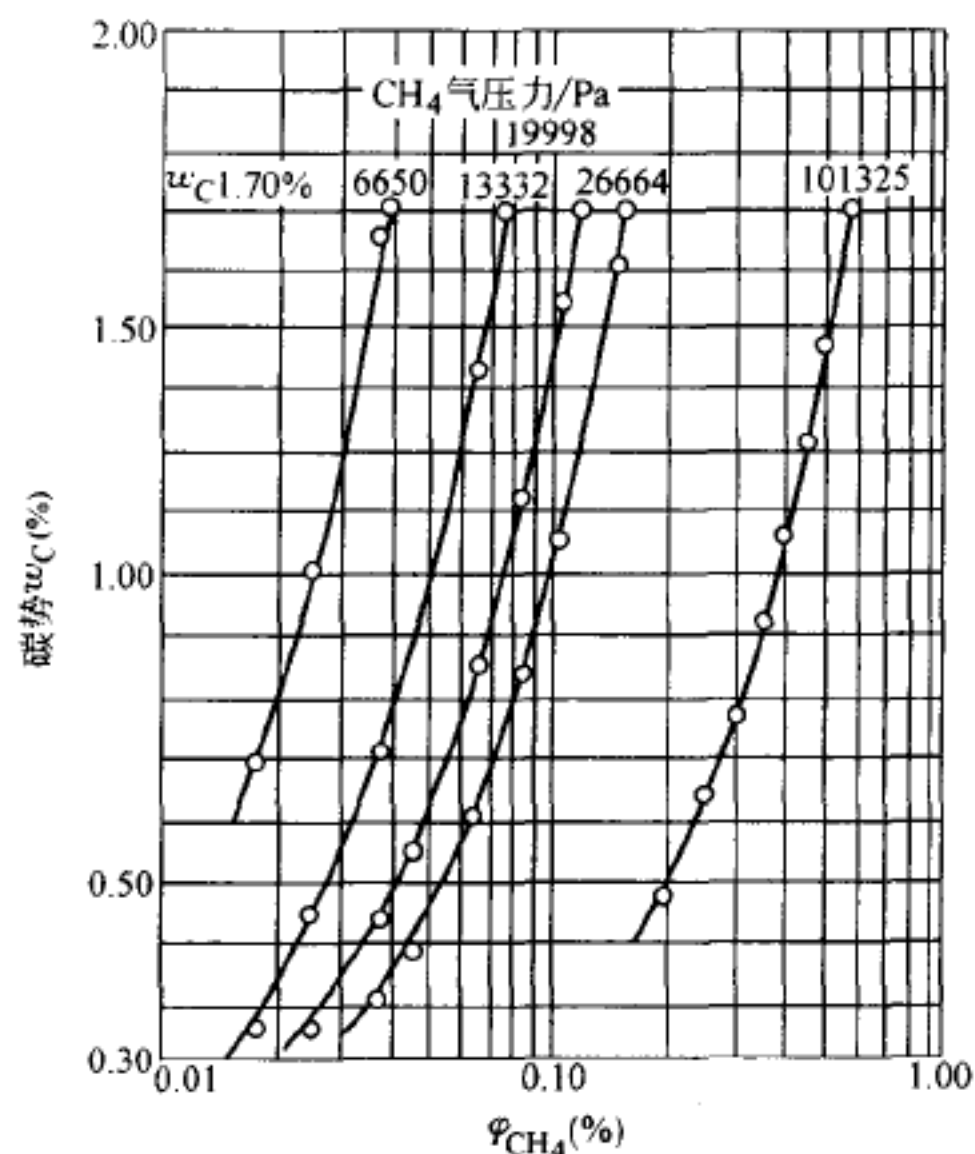


图 12-29 真空渗碳碳势与炉气压力

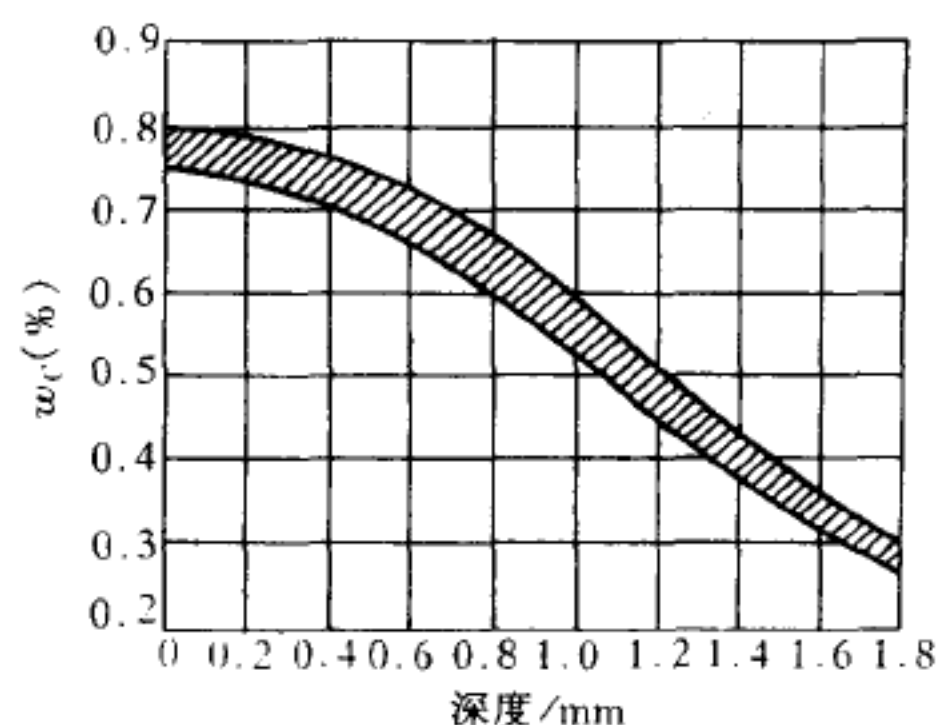
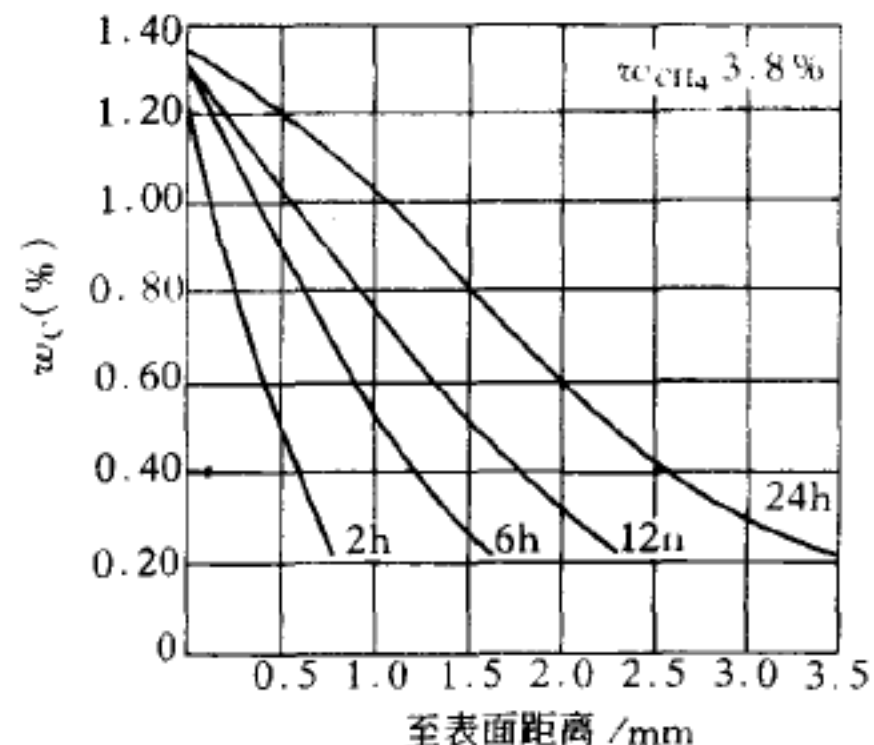
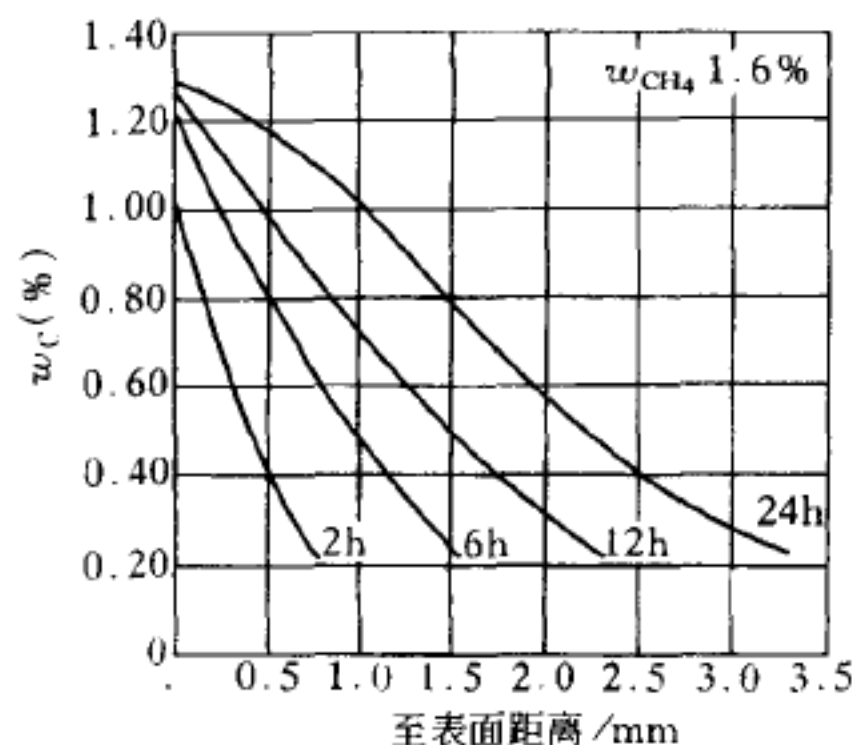


图 12-30 925 $^{\circ}\text{C}$ 真空渗碳产生碳的均匀性
 炉膛尺寸: 910mm \times 1220mm \times 610mm 材料: 9310 钢
 (齿轮) 总周期: 11h, 40kPa, 渗碳周期: 4.5h,
 要求碳含量: 表面 w_C 0.75% ~ 0.8%; 表层
 下 1.5mm 处 w_C 0.2% ~ 0.35%

图 12-31 20 钢于 920 $^{\circ}\text{C}$ 在 $w_{\text{CO}} = 20\%$, $w_{\text{CH}_4} = 40\%$ 气体中渗碳时甲烷加入量对碳浓度分布曲线的影响

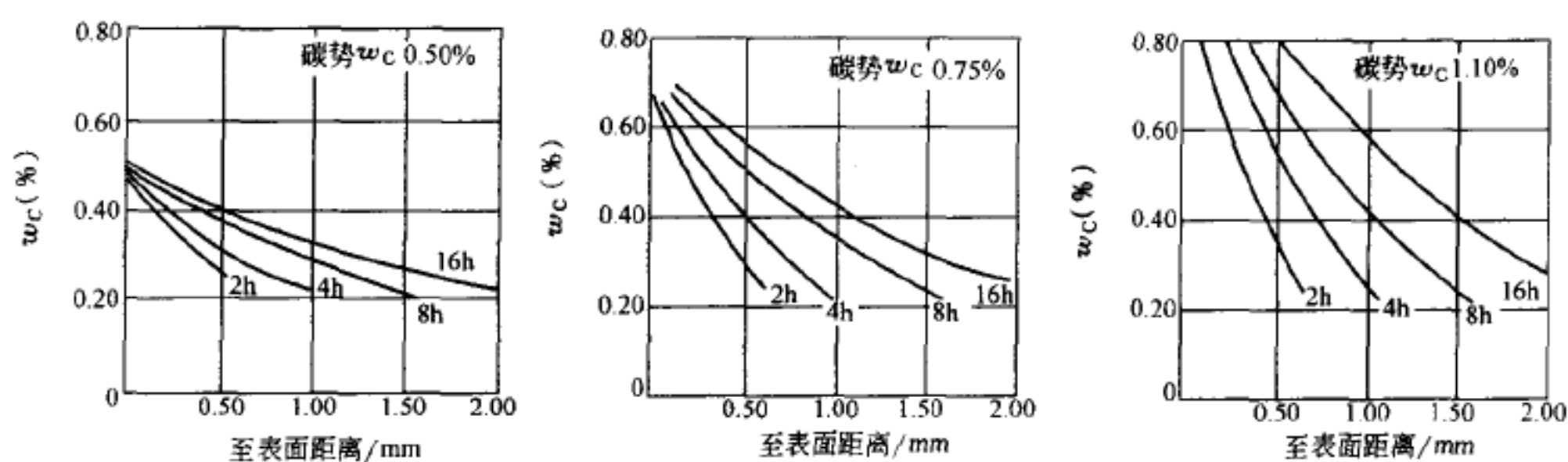


图 12-32 20 钢于 920℃ 在 $w_{CO} 20\%$ 、 $w_{H_2} 40\%$ 气氛中
渗碳时碳势对碳浓度分布曲线的影响

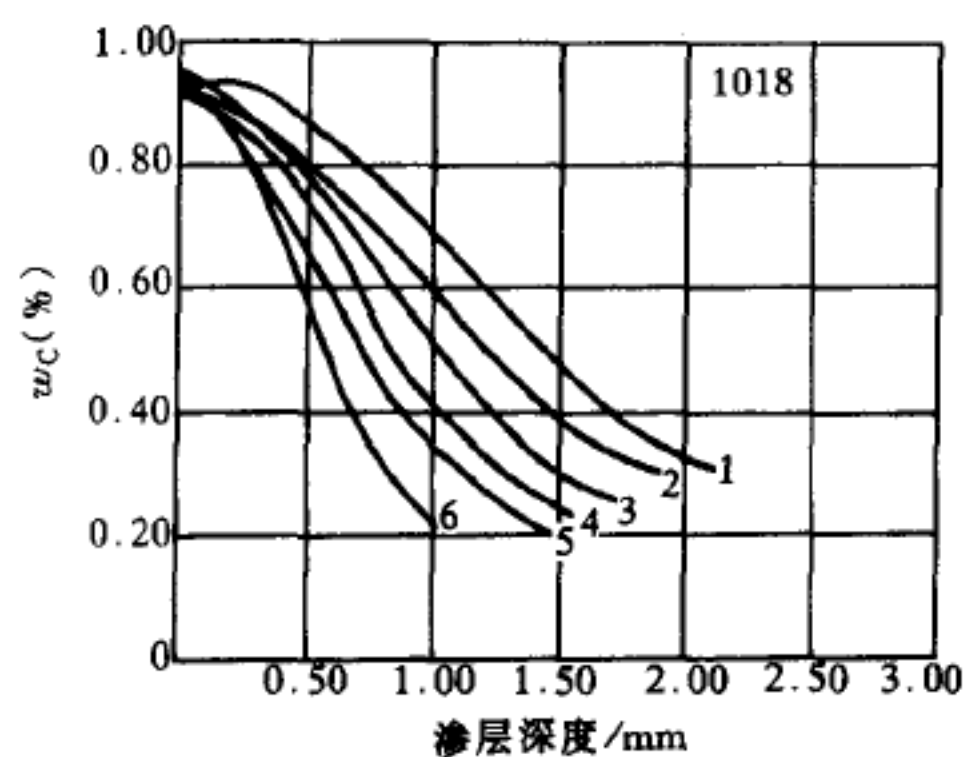


图 12-33 渗碳温度对渗层深度的影响
(1018 钢, 在该温度下 3h)

	渗碳温度/℃	露点/℃
1	1065	-22 ~ -21
2	1040	-19 ~ -18
3	1010	-17 ~ -16
4	980	-14 ~ -13
5	955	-12 ~ -11
6	925	-10 ~ -9

天然气富化的吸热式气氛通过露点法自动控制
碳势获得表面碳含量为 $w_c 0.9\% \sim 0.95\%$

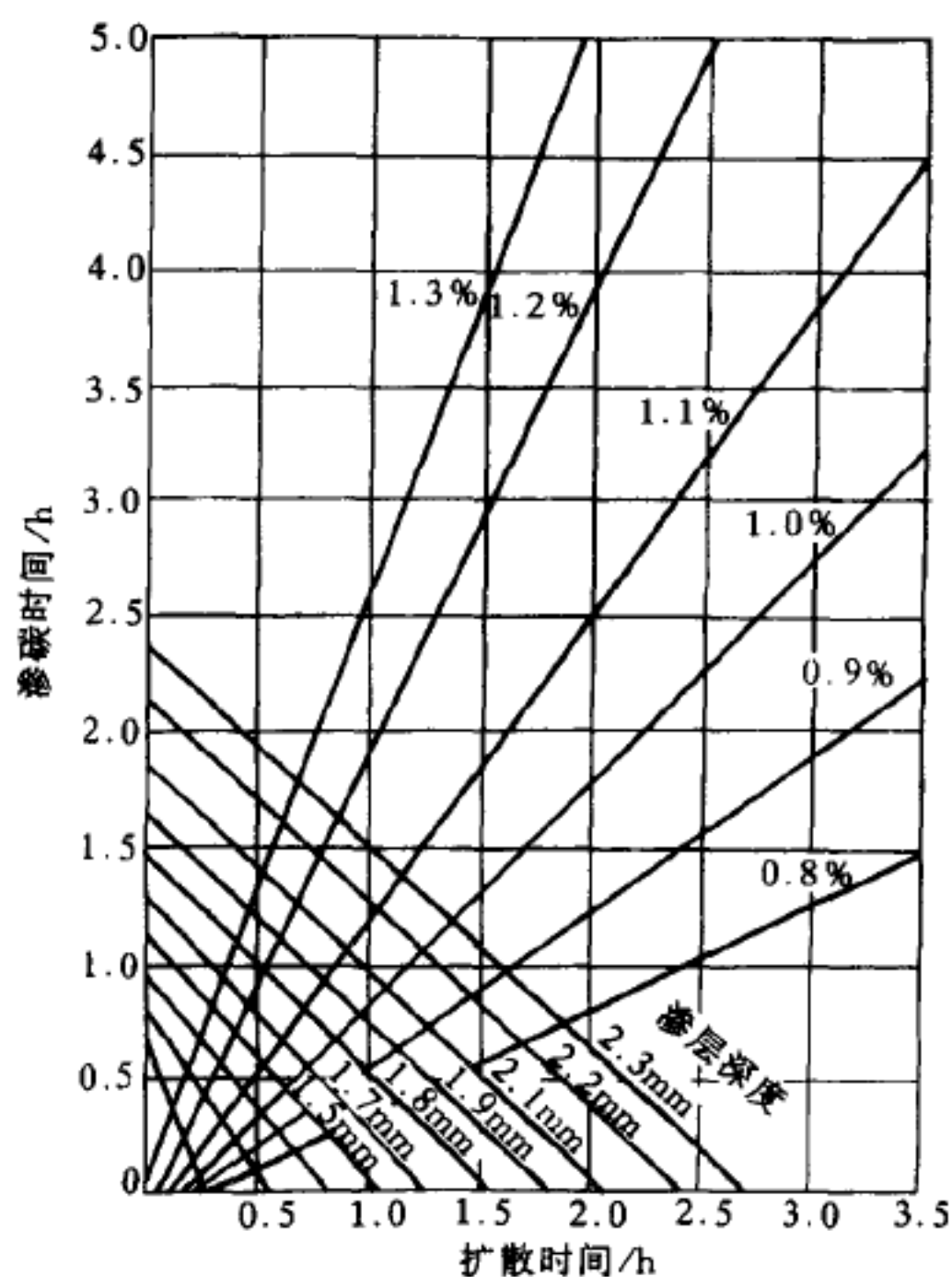


图 12-34 在 1040℃, 渗碳时间和扩散时间
与总渗层深度及表面碳含量的关系

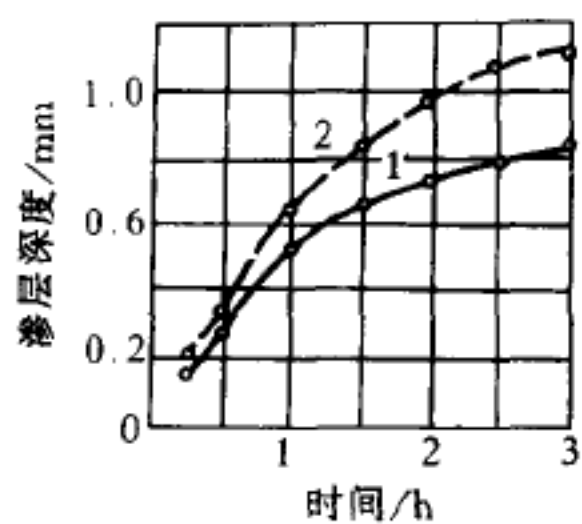


图 12-35 在 870℃ 液体渗碳时, 渗层深度与保温时间的关系
1—15 钢 2—20Cr 钢

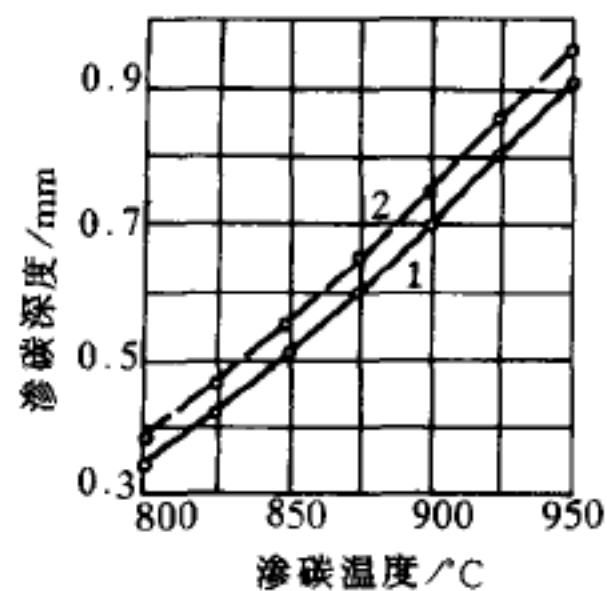


图 12-36 在保温 1h 条件下渗层深度与渗碳温度的关系
1—15 钢 2—20Cr 钢

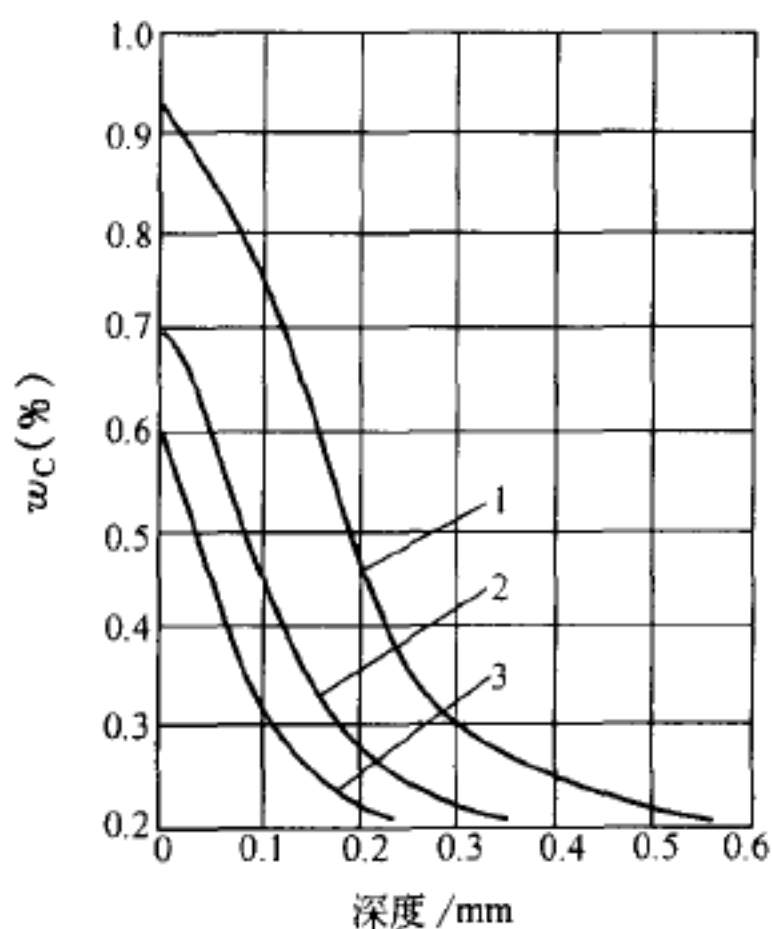


图 12-37 8620 钢在 845℃ 真空渗碳, 时间对碳分布的影响单独渗碳 (40kPa)
1—60min 2—20min 3—10min

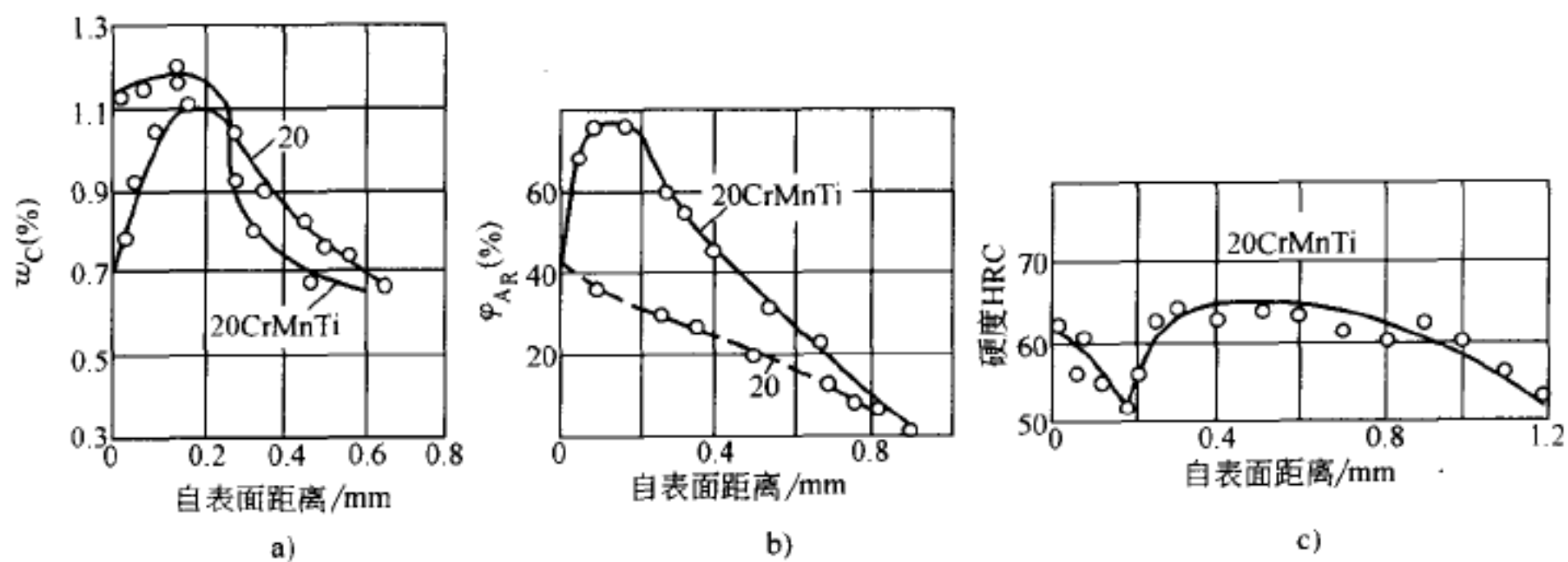


图 12-38 20CrMnTi 钢 920℃ 渗碳 6h 直接淬火后渗层中奥氏体碳含量
残留奥氏体量及硬度分布曲线
a) 渗层中奥氏体中碳含量 b) 残留奥氏体量 c) 渗层硬度

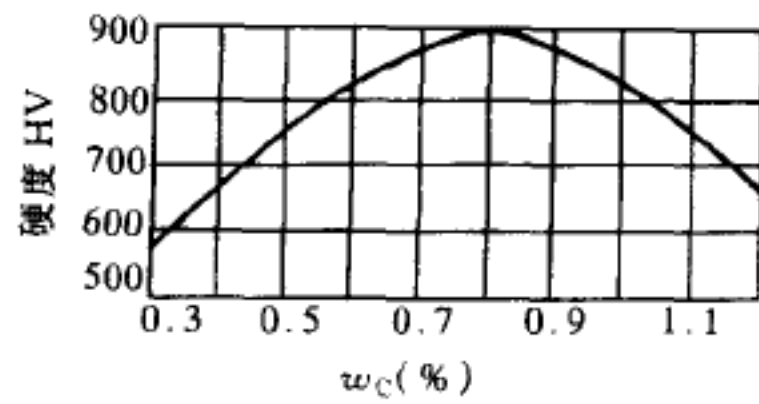


图 12-39 15 钢渗碳淬火后的最高表面硬度与表面碳含量的关系

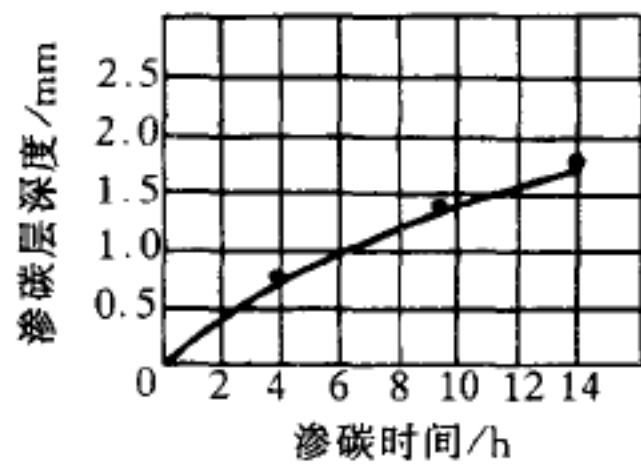


图 12-40 20 钢渗碳速度曲线
(930℃滴注式可控气氛渗碳)

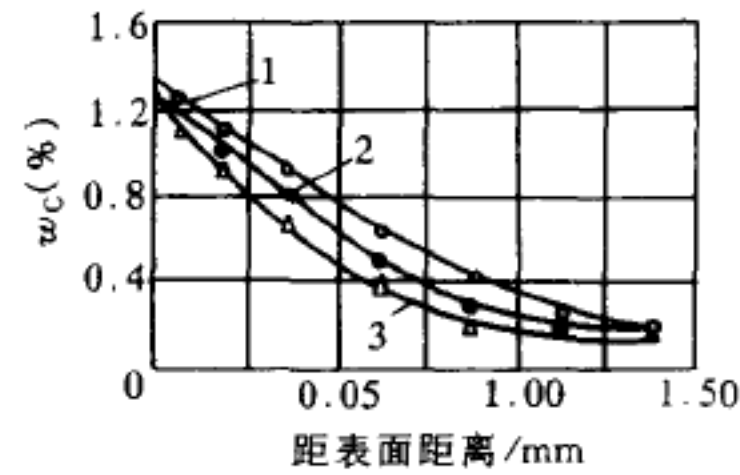


图 12-41 1020 (20) 钢渗碳 4h 后的碳浓度分布
1—925℃ 2—900℃ 3—870℃

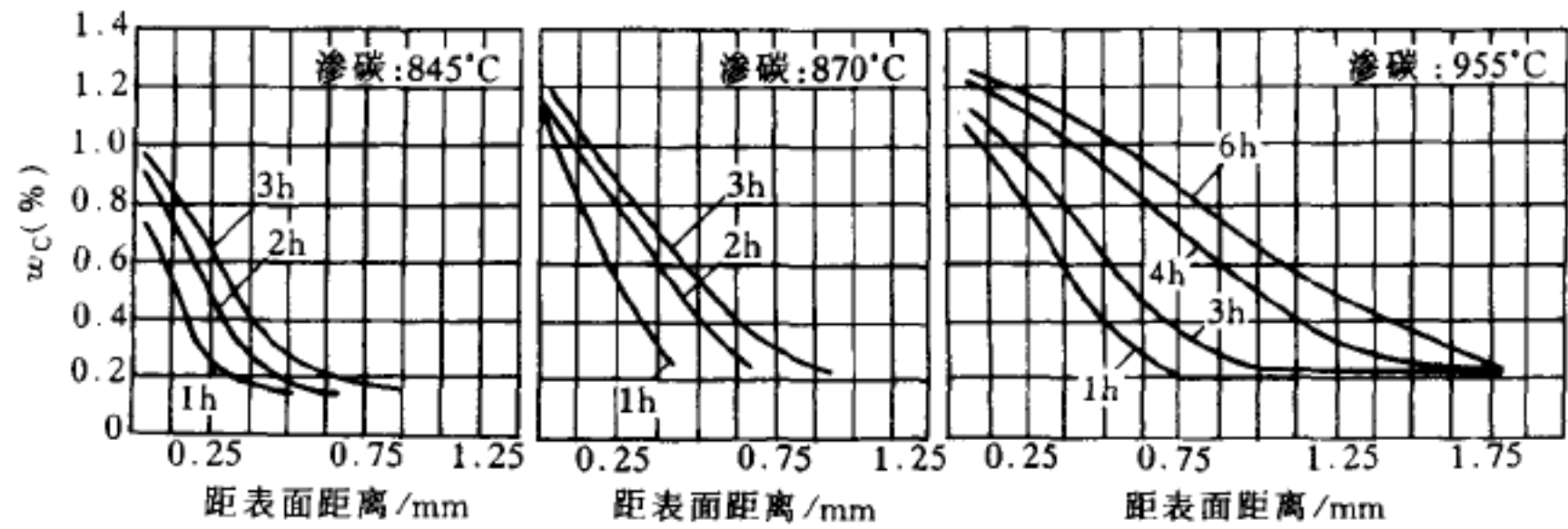


图 12-42 1020 (20) 钢液体渗碳温度和时间对碳梯度的影响
(试样尺寸为 $\phi 25\text{mm}$)

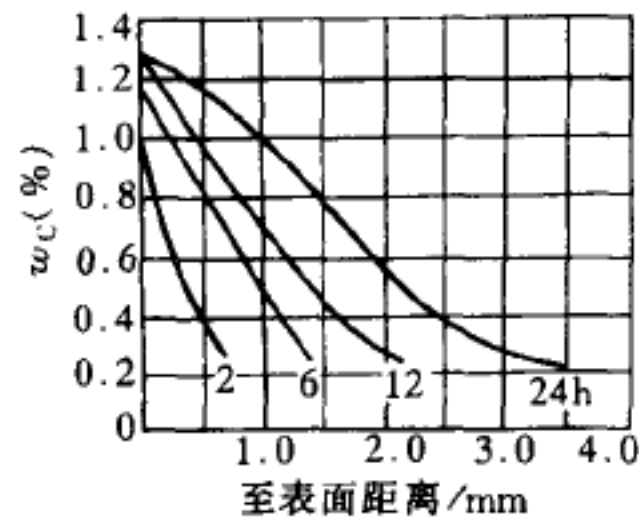


图 12-43 20Mn 钢 920℃ 渗碳不同时间后的碳浓度分布
(w_{CH_4} 1.6% + 保护气)

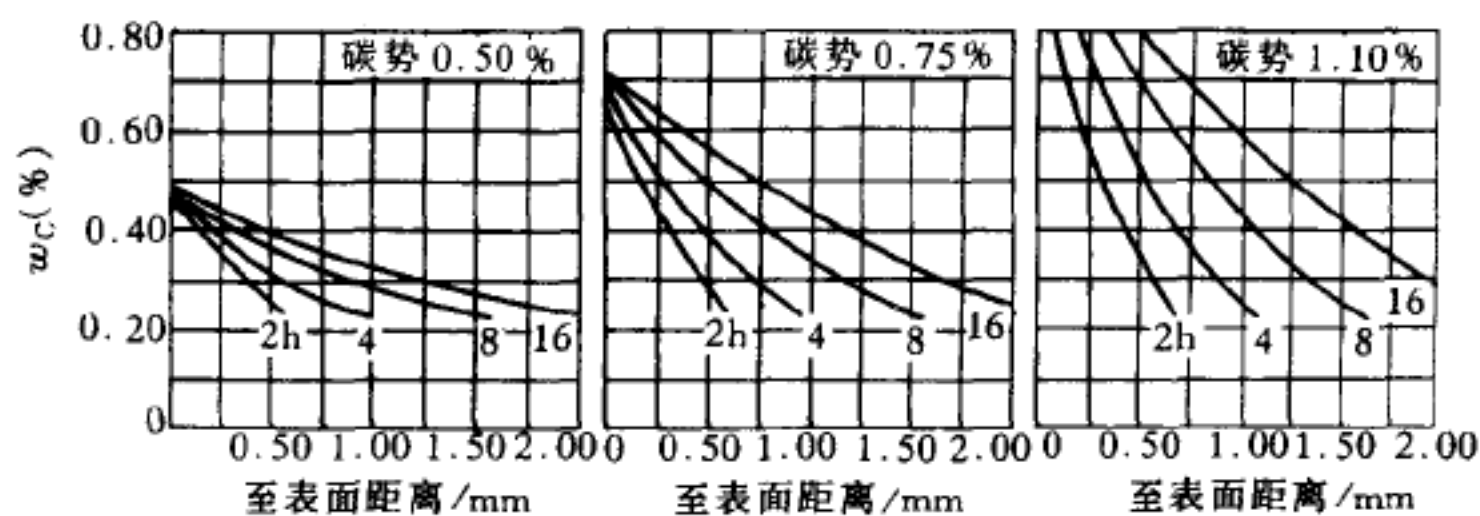


图 12-44 1022 (20Mn) 钢在不同碳势下渗碳不同时间后的碳浓度分布
(918℃ 渗碳; 炉气成分: $w_{CO} 20\% + w_{H_2} 40\% +$ 一定量的 H_2O 气)

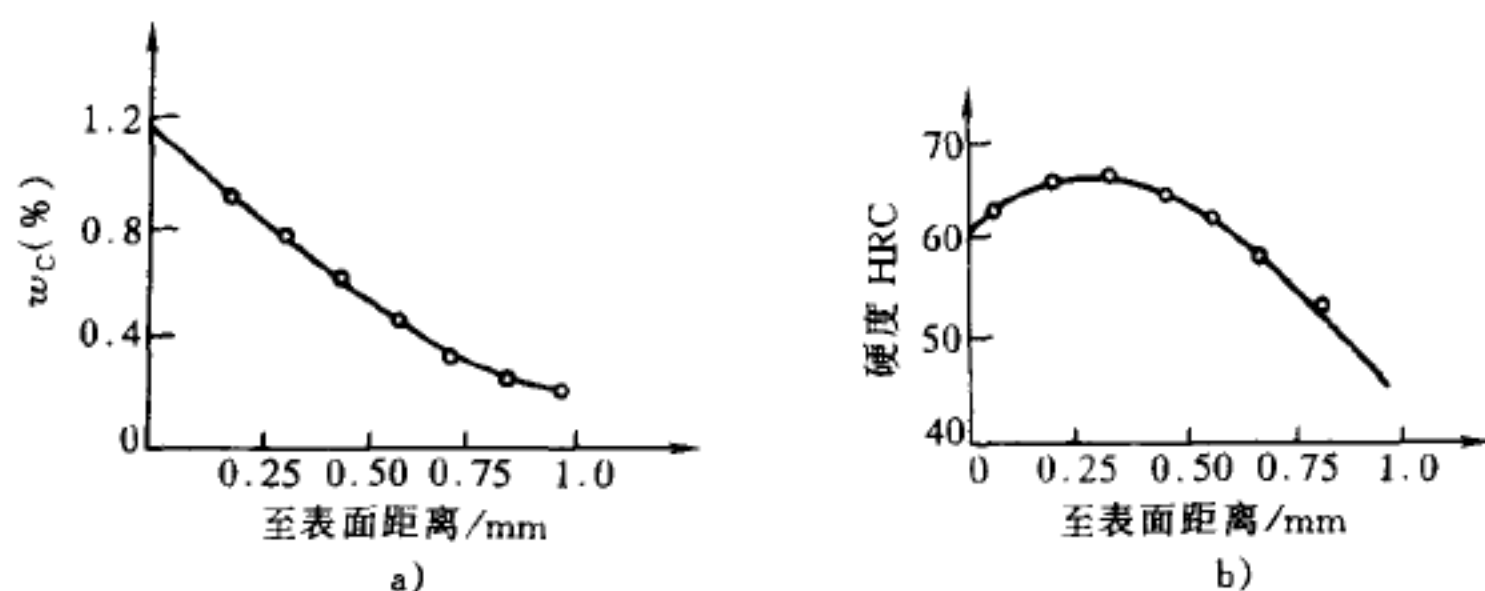


图 12-45 低碳锰钢渗碳层的碳浓度 a) 和硬度 b) 分布

(渗碳: $900^\circ\text{C} \times 2.3\text{h}$; 834°C 油淬)

心部成分 (质量分数, %): $C 0.24 \quad Mn 1.32$

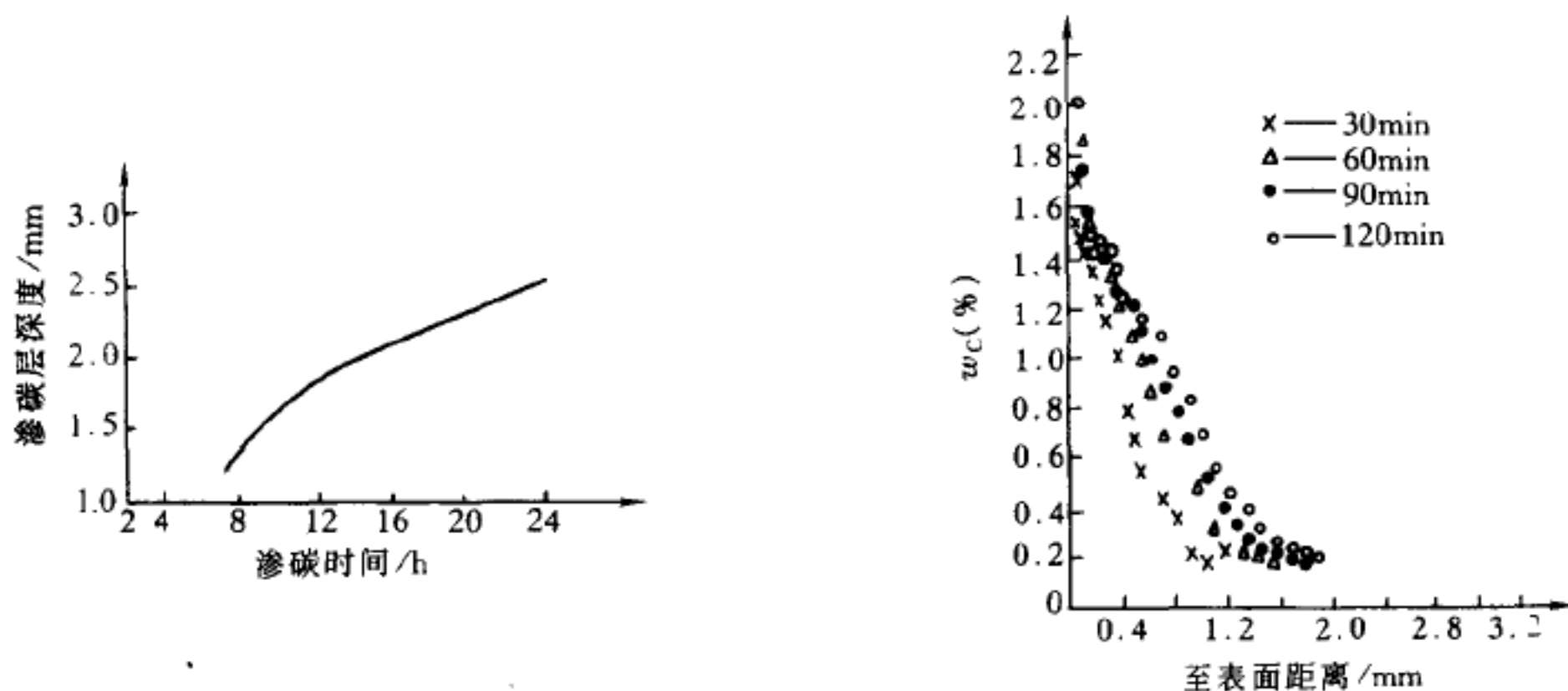


图 12-46 15Cr 钢渗碳时间与渗层深度的关系
(940℃ 固体渗碳)

图 12-47 15Cr 钢真空渗碳时间 t_A 对碳含量变化的影响
(渗碳温度: 1035°C ; $45\text{kPaCH}_4 + 21\text{kPaN}_2$)

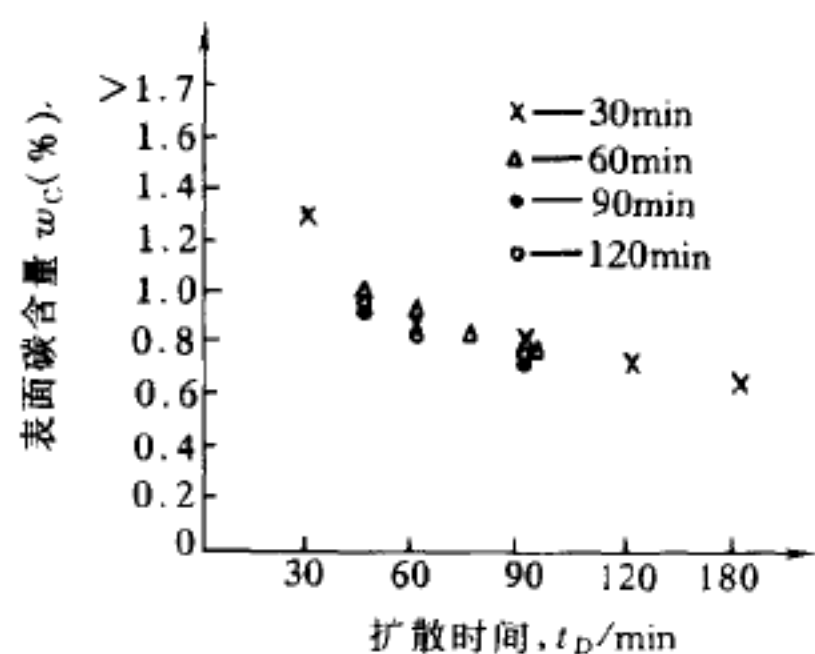


图 12-48 15Cr 钢真空渗碳扩散时间 t_D 对表面碳含量的影响
(条件同图 12-47)

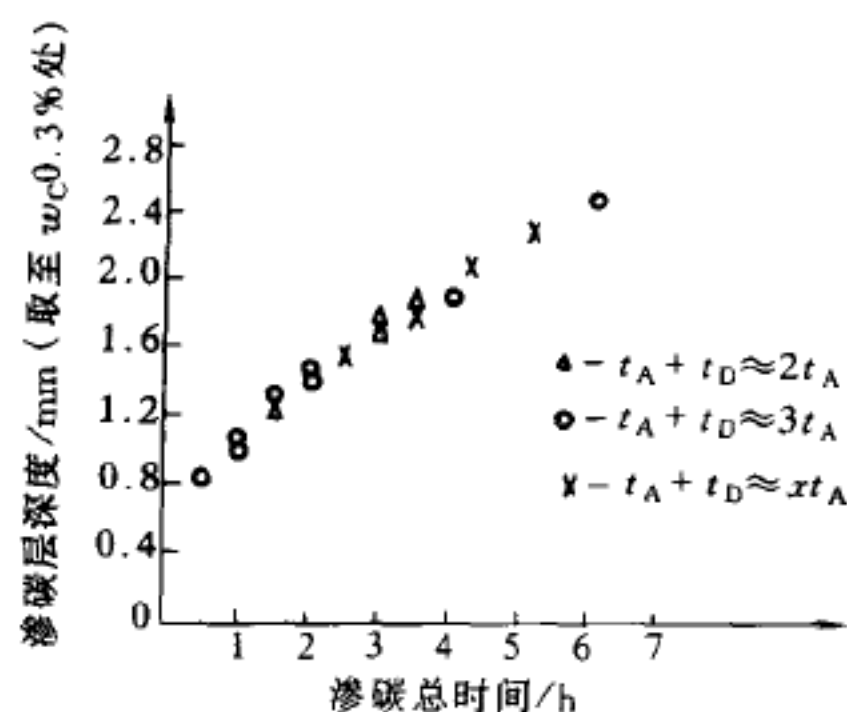


图 12-49 15Cr 钢真空渗碳总时间 ($t_A + t_D$) 对渗层深度 V_s 的影响
(条件同图 12-47)

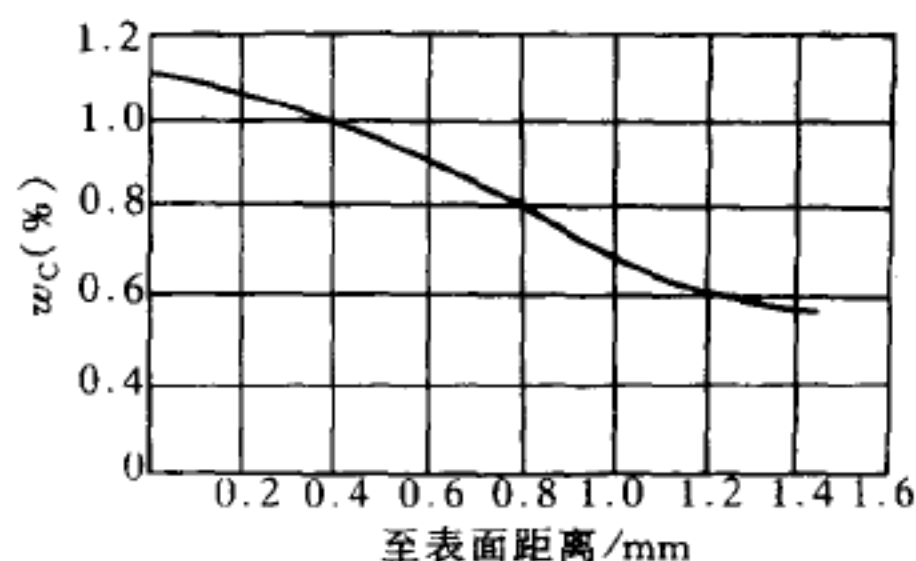


图 12-50 20CrMnMo 钢渗碳层碳浓度变化曲线
(940℃ 渗碳, 井式炉, 渗碳剂煤油, 880℃ 出炉缓冷)

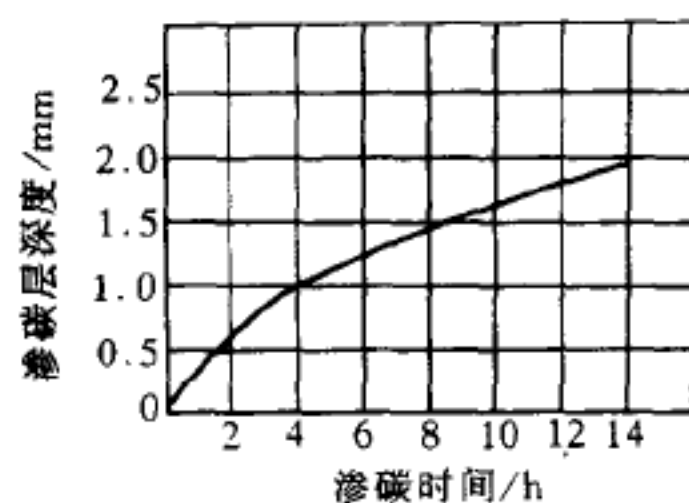


图 12-51 18CrMnTi 钢渗碳速度曲线
(930℃ 滴注式可控气氛渗碳)

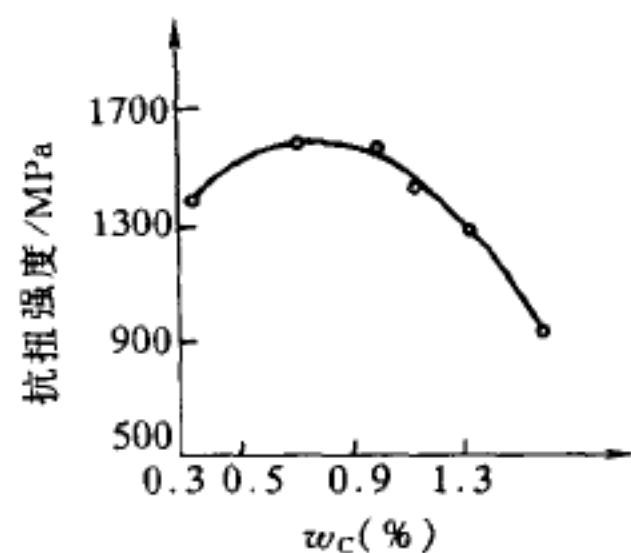


图 12-52 20CrMnTi 钢渗碳后的表面碳浓度对扭转强度的影响
($w_c 0.6\%$ 时为切断, 其余为正断)

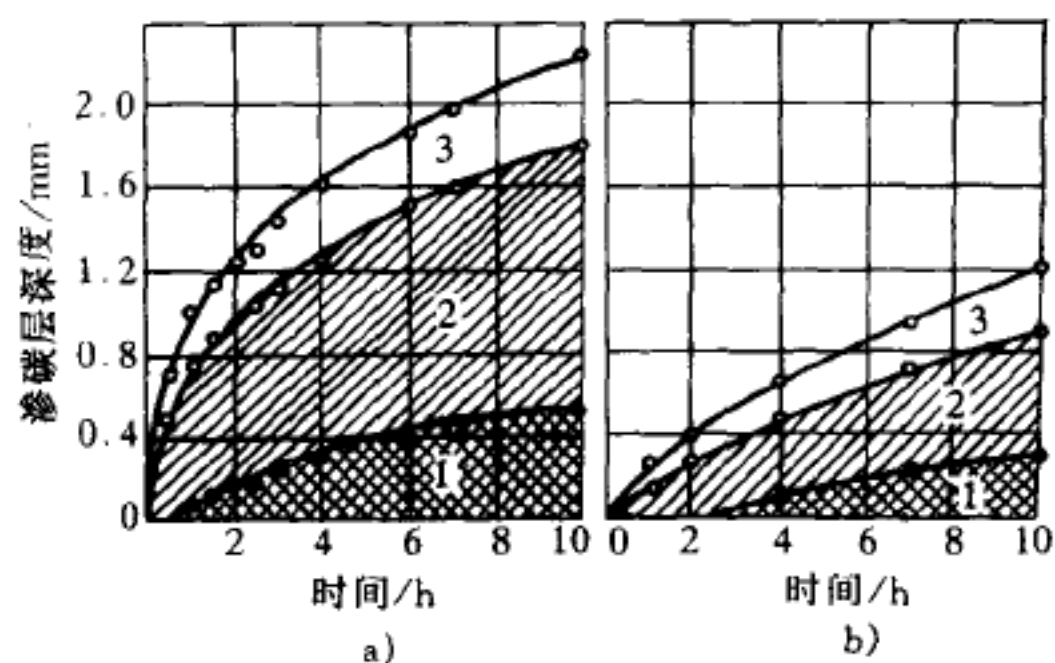


图 12-53 12CrNi3 钢 950℃ 渗碳时, 渗碳时间与渗碳深度的关系
a) 流动粒子炉, $\alpha = 0.26$, 通入 20% 气体
b) 井式炉—105kW
1—亚共析体 2—共析体 3—过共析体

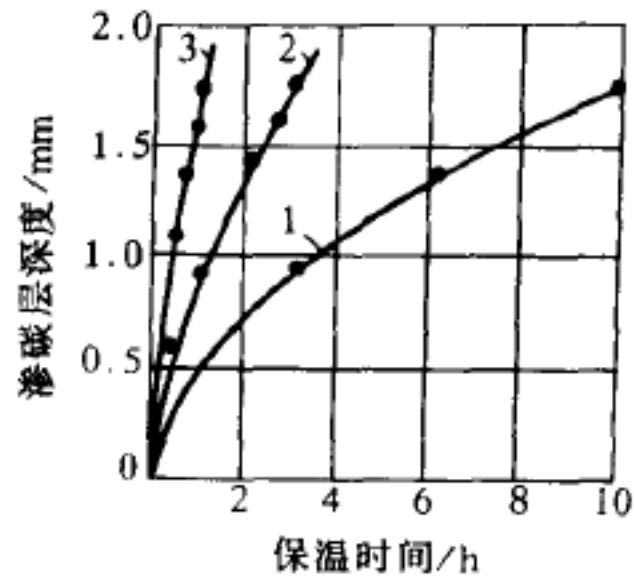


图 12-54 20Cr2Ni4 钢渗碳时间与渗碳层深度的关系

1—普通气体渗碳, 940℃ 2—离子渗碳, 940℃ 3—离子渗碳, 1000℃

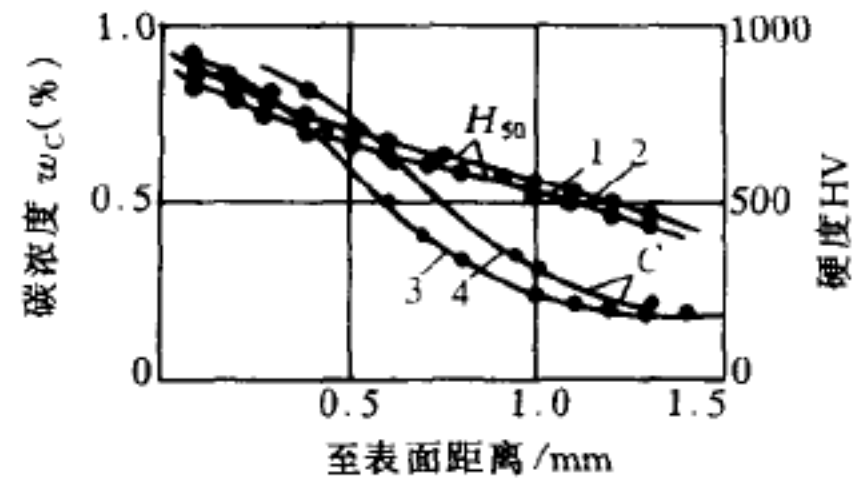


图 12-55 20Cr2Ni4 钢热处理后渗碳层的显微硬度与碳浓度的关系

1、3—普通气体渗碳, 940℃ × 6h
2、4—离子渗碳, 1000℃ × 20min

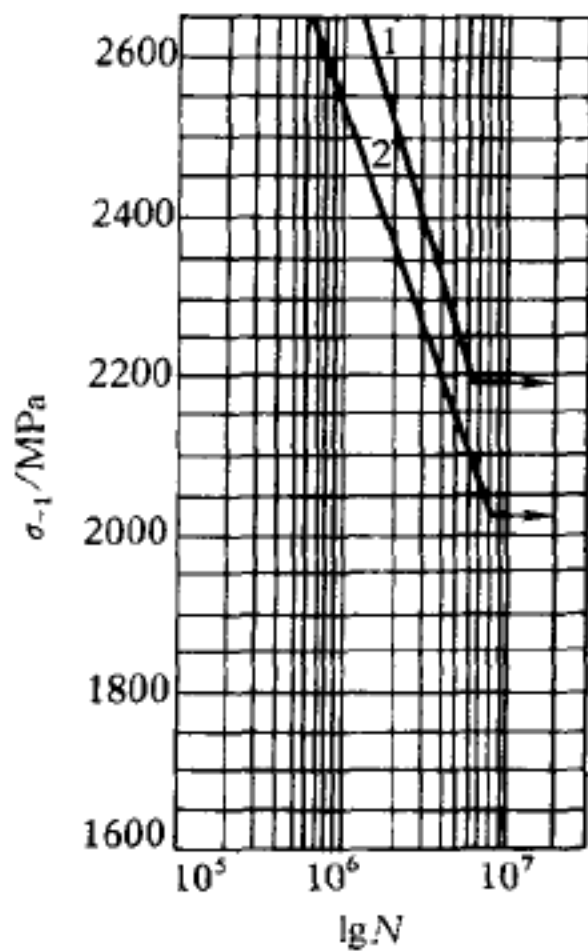


图 12-56 20Cr2Ni4 钢渗碳淬火后的接触疲劳曲线

1—渗碳层深度 0.1mm, 表面硬度 750HV
2—渗碳层深度 0.1mm, 表面硬度 750HV, 渗碳淬火轻磨削

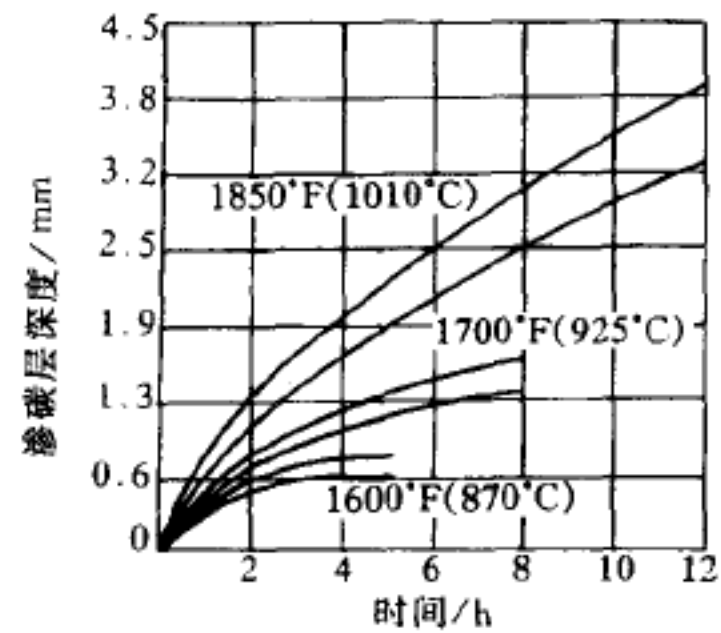


图 12-57 20CrNiMo (AISI8620) 钢渗碳层深度与渗碳时间和温度的关系

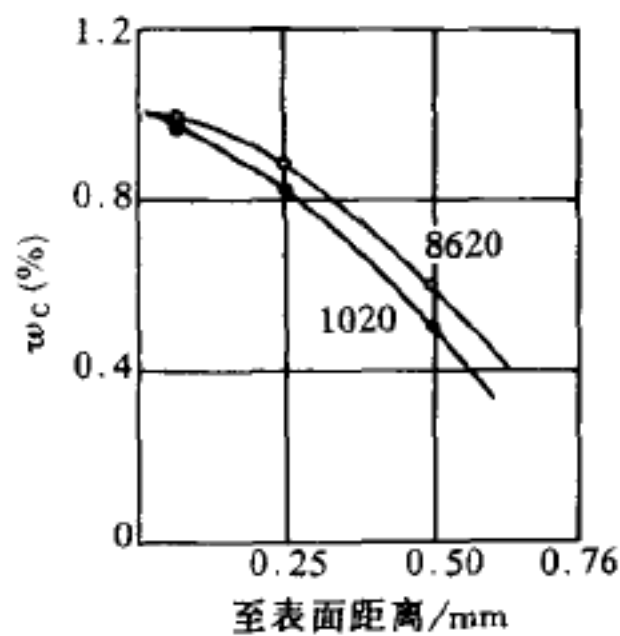


图 12-58 20 (1020) 和 20CrNiMo (8620) 钢真空渗碳后的碳浓度分布曲线
(1040℃ 渗碳和扩散 32min)

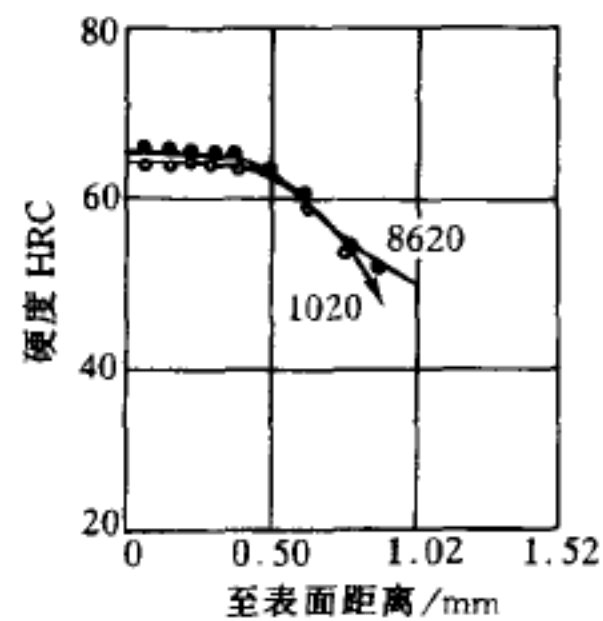


图 12-59 20 (1020) 和 20CrNiMo (8620) 钢真空渗碳后的硬度分布曲线
(条件同图 12-58)

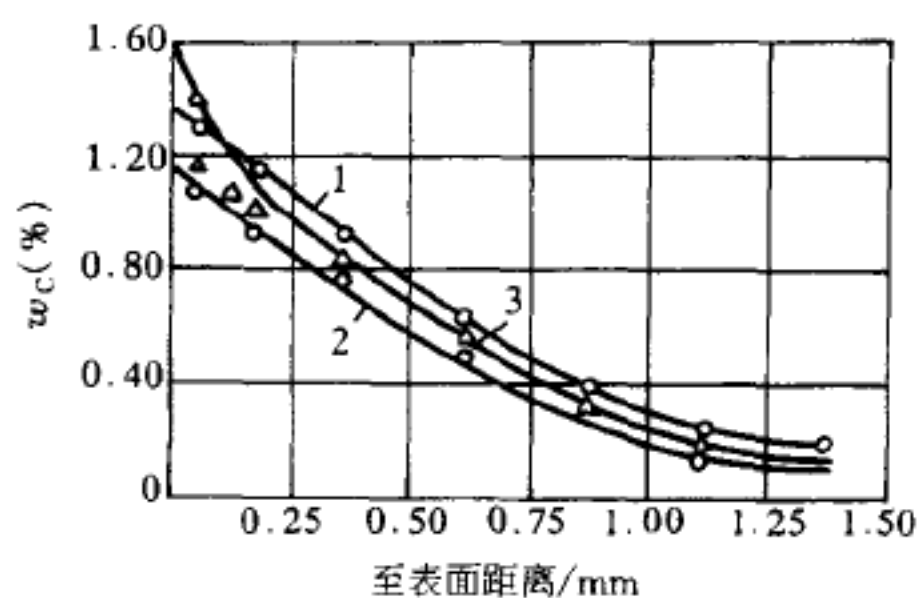


图 12-60 三种钢在 925℃ 渗碳 4h 后
渗层的碳浓度分布曲线
1—20 钢 2—12Ni5 3—12CrNi3

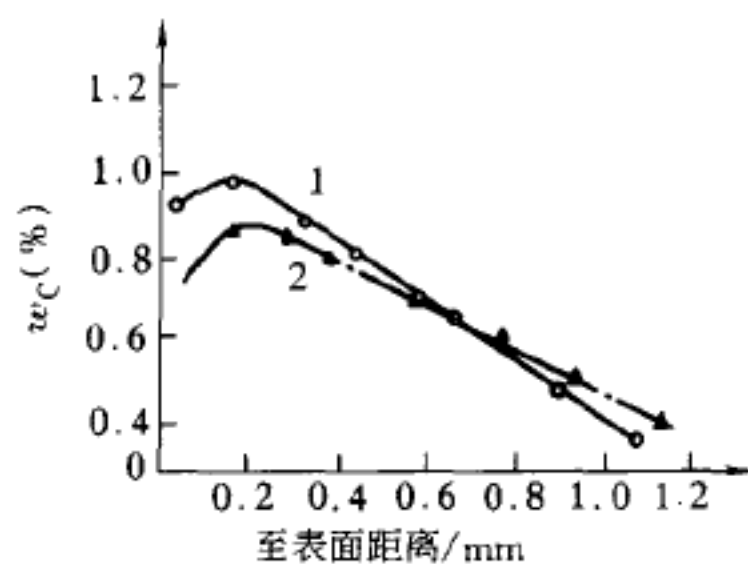


图 12-61 15 钢于 915℃ 和 945℃
渗碳后的碳浓度分布
(在滴注式可控气氛中渗碳; 表面
碳含量较低系渗碳后期碳势降所致)
1—915℃ 2—945℃

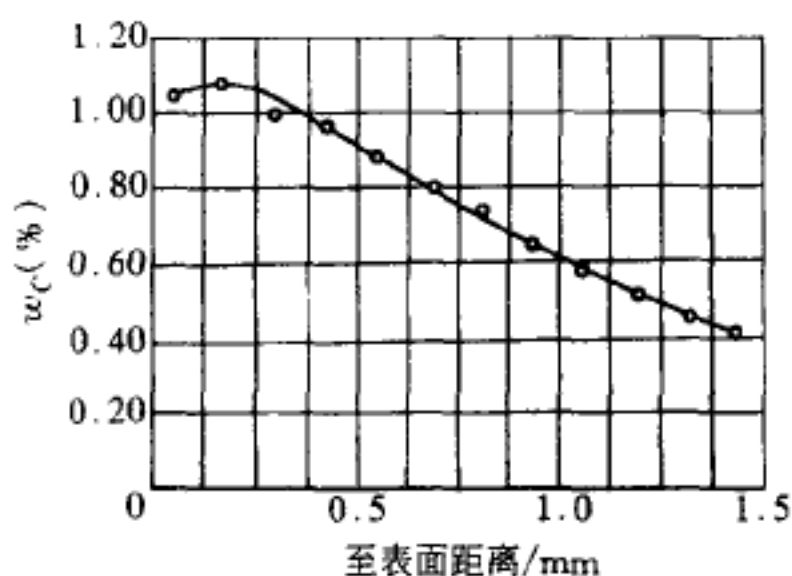


图 12-62 20CrNiMo 钢盐浴渗碳 (910℃ × 8h
试样尺寸: $\phi 19\text{mm} \times 50\text{mm}$)
后的碳浓度分布

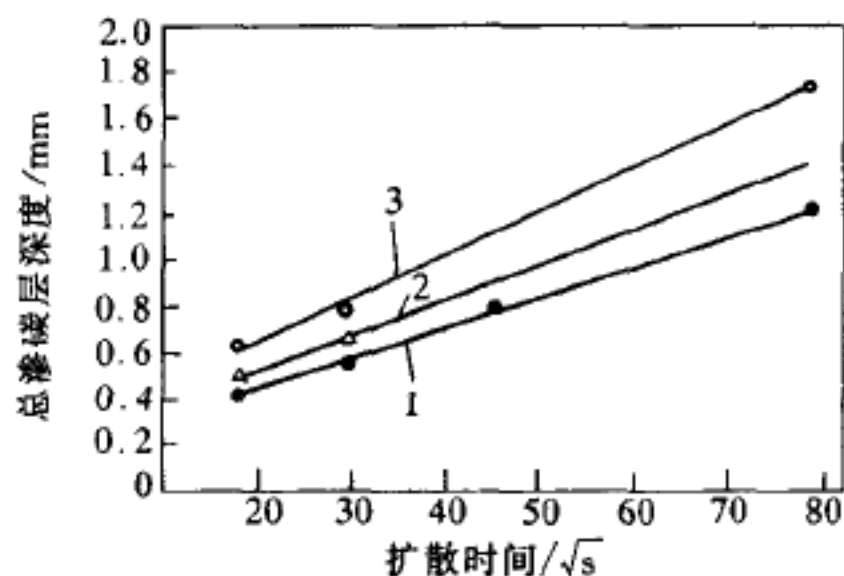


图 12-63 20CrNiMo (SNCM21) 钢渗碳时
扩散层深度与扩散时间的关系
1—900℃ 2—950℃ 3—1000℃
 $D = 0.013\sqrt{t} + 0.32$ $D = 0.015\sqrt{t} + 0.36$
 $D = 0.019\sqrt{t} + 0.44$

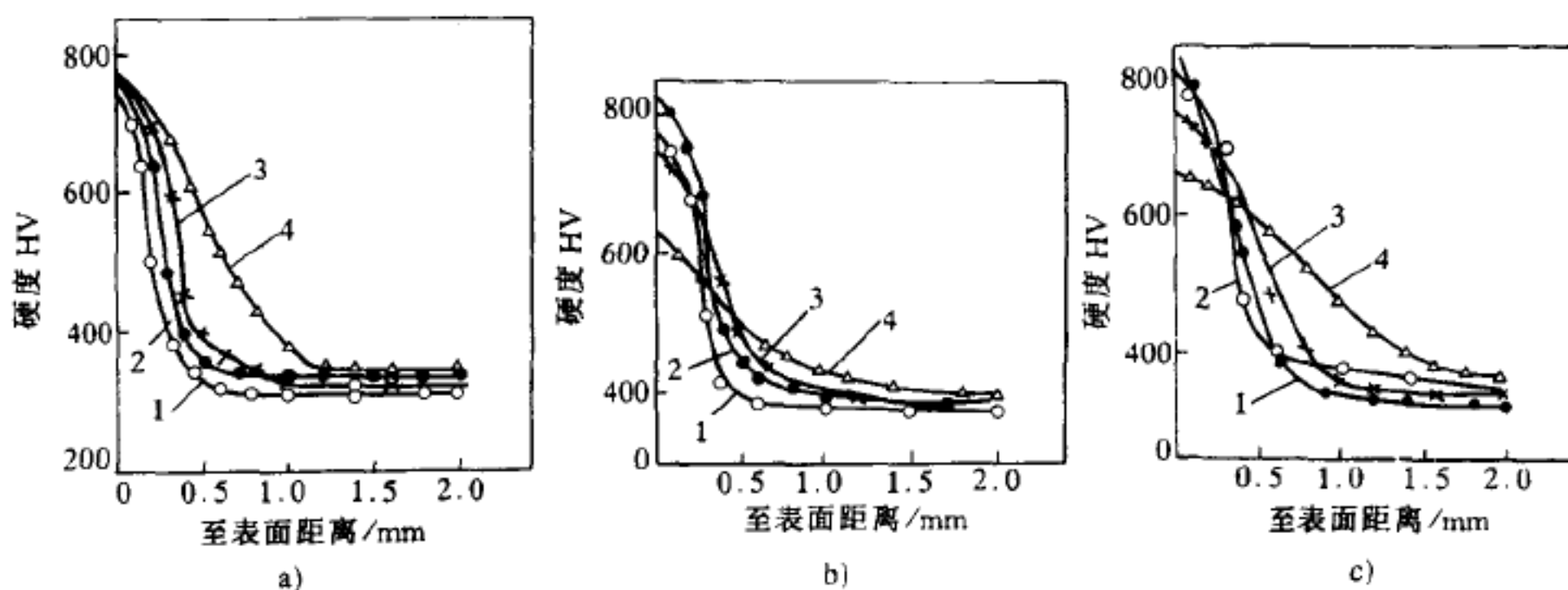


图 12-64 20CrNiMo (JIS SNCM21) 钢分别在 a) 900℃、b) 950℃ 和 c) 1000℃ 真空渗碳的结果
1—5min 2—15min 3—35min 4—105min
(试样渗碳后, 830℃ × 30min, 油淬, 180℃ 回火 2h)

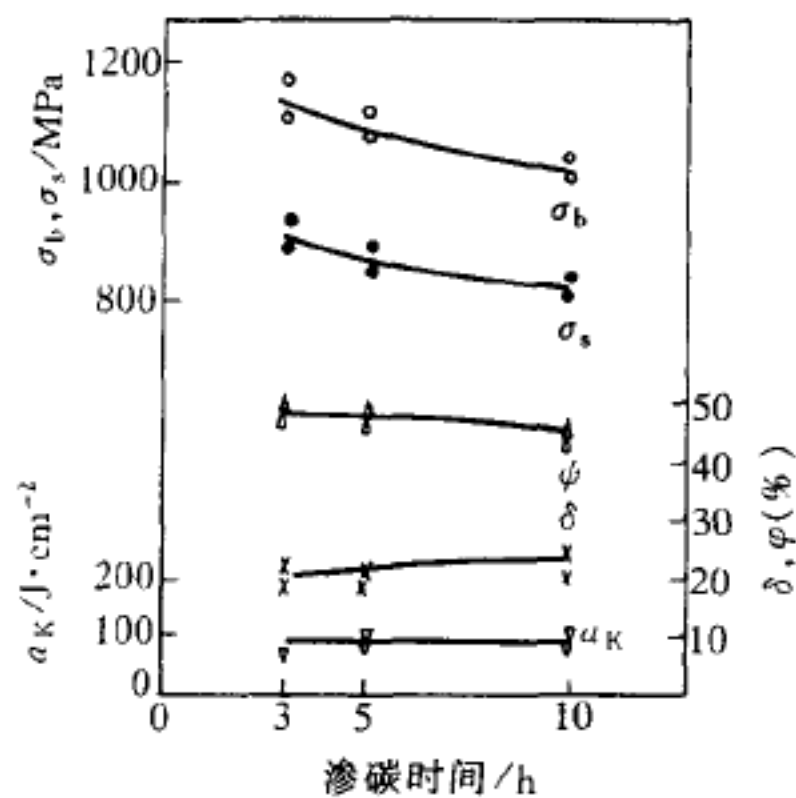


图 12-65 20CrNiMo (SNCM21) 钢的心部力学性能与在渗碳温度 1000℃ 时的保温时间的关系

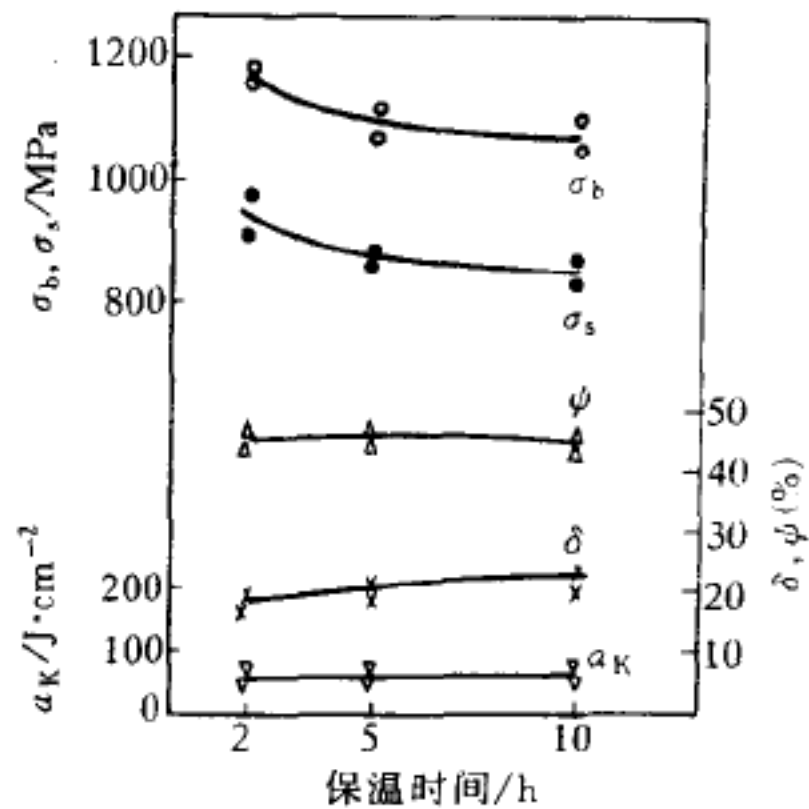


图 12-66 20CrNiMo 钢的心部力学性能与在渗碳温度 1040℃ 时的保温时间的关系

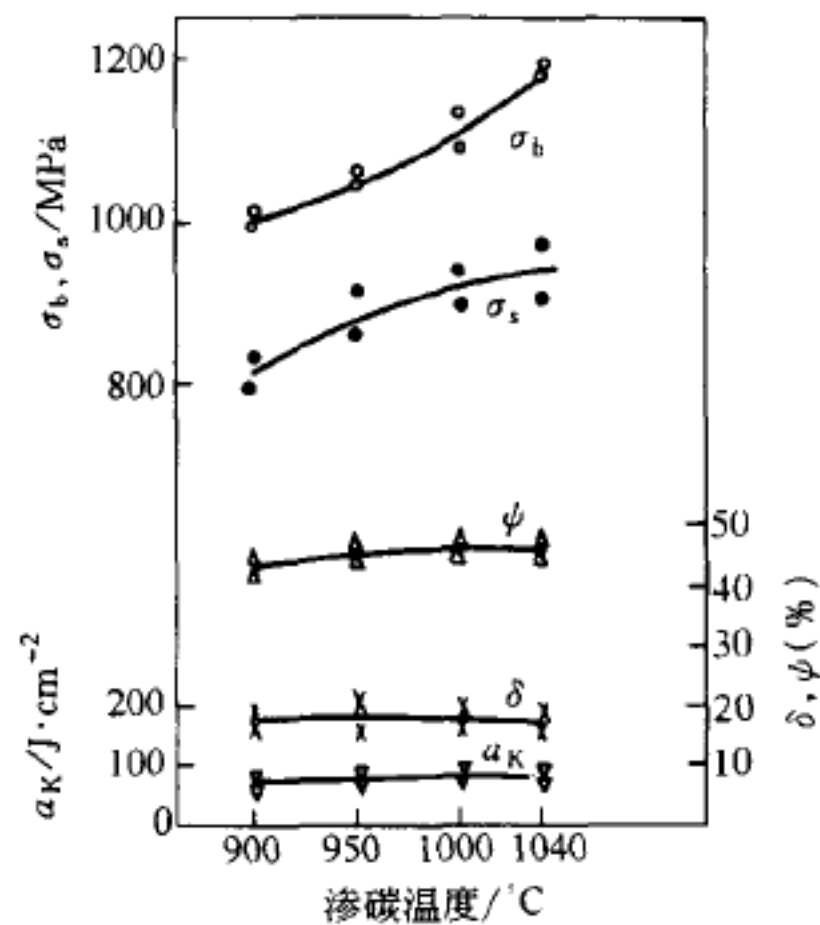


图 12-67 20CrNiMo (SNCM21) 钢真空渗碳温度对心部力学性能的影响

表 12-22 常用结构钢的渗碳、淬火、回火热处理规范及性能

钢 号	渗碳温度	淬 火		回 火		表面硬度 HRC
		温度/℃	介质	温度/℃	介质	
10	920 ~ 940	890 + 780	水	—	—	62 ~ 65
15	920 ~ 940	760 ~ 800	水	160 ~ 200	—	—
20	920 ~ 940	770 ~ 800	水	160 ~ 200	—	—
25	920 ~ 940	—	—	—	—	—
20Mn	910 ~ 930	770 ~ 800	水	160 ~ 200	—	58 ~ 64
20Mn2	910 ~ 930	810 ~ 890	油	150 ~ 180	空气	≥ 55
15MnV	900 ~ 940	降至 820 ~ 840	油	180 ~ 220	空气	≥ 55
20MV	900 ~ 940	800 ~ 840	油	160 ~ 200	空气	≥ 56
20Mn2B	910 ~ 930	800 ~ 830	油	150 ~ 200	空气	≥ 57

(续)

钢 号	渗碳温度	淬 火		回 火		表面硬度 HRC
		温度/℃	介质	温度/℃	介质	
25MnTiB	930	降至 830 ~ 860	油	180 ~ 200	空气	≥ 58
20Mn2TiB	930 ~ 950	降至 830 ~ 860	油	180 ~ 200	空气	56 ~ 62
20SiMnVB	920 ~ 940	860 ~ 880	油	180 ~ 200	空气	56 ~ 61
23SiMn2Mo	930	850 + 780	油	180	空气	≥ 58
24SiMnMoVA	900 ~ 940	840 ~ 860	油	160 ~ 200	空气	≥ 58
15SiMn3MoA	930	760 ~ 800	油	150 ~ 180	空气	≥ 58
12SiMn2WVA	930	780 ~ 800	油	160 ~ 180	空气	≥ 58
15Cr	900 ~ 930	780 ~ 820	油	170 ~ 190	空气	≥ 56
	900 ~ 930	降至 870	油	180 ~ 200	空气	≥ 54
20Cr	920 ~ 940	770 ~ 820	油或水	160 ~ 200	油或空气	58 ~ 64
20CrV	920 ~ 940	770 ~ 820	水或油	180 ~ 200	—	—
20CrMo	920 ~ 940	810 ~ 830	油或水	160 ~ 200	—	58 ~ 64
25CrMo	920 ~ 940	770 ~ 810	—	160 ~ 200	—	—
15CrMn	920 ~ 940	780 ~ 920	—	160 ~ 200	—	—
20CrMn	910 ~ 930	810 ~ 830	—	180 ~ 200	—	—
15CrMnMo	900 ~ 920	780 ~ 800	油	180 ~ 200	空气	≥ 53
20CrMnMo	900 ~ 930	810 ~ 830	油	180 ~ 200	空气	58 ~ 63
20Cr2Mn2Mo	920 ~ 940	870 ~ 880	油	620 ~ 650	—	—
		810 ~ 830	油	160 ~ 180	—	—
20CrMnTi	920 ~ 940	降至 820 ~ 850	油	180 ~ 200	空气	—
	920 ~ 940	830 ~ 870	油	180 ~ 200	空气	56 ~ 63
20CrNi	900 ~ 930	800 ~ 820	油	180 ~ 200	—	58 ~ 63
12CrNi2A	900 ~ 940	810 ~ 840	油	150 ~ 200	油或空气	≥ 56
12CrNi3A	900 ~ 920	810 ~ 830	油	150 ~ 200	空气	≥ 58
12Cr2Ni4A	900 ~ 930	770 ~ 800	油	160 ~ 200	空气	≥ 60
20Cr2Ni4A	900 ~ 930	780 ~ 820	油	160 ~ 200	空气	≥ 58
	900 ~ 950	810 ~ 830	油	150 ~ 180	空气	≥ 58
18Cr2Ni4WA	900 ~ 940	840 ~ 860	油	150 ~ 200	空气	≥ 56
20CrNiMo	920 ~ 940	780 ~ 820	油	180 ~ 200	空气	58 ~ 65
20Ni4Mo	930	780 ~ 840	油	150 ~ 180	空气	≥ 56
20Cr2Mn2SiMoA	920 ~ 950	降至 890	油	600 + 620	空气	≤ 269
		810 ~ 830	油	150 ~ 180	空气	58 ~ 60

表 12-23 20 钢渗碳后的力学性能

毛坯尺寸 /mm	热 处 理	取样 部位	力 学 性 能				
			σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ_5 (%)	ψ (%)	硬 度
25	940℃ 正火, 930℃ × 3h 渗碳, 880℃ 水淬, 230℃ 回火空冷	中心	609	442	39	64	—
25	940℃ 正火, 930℃ 加热 3h, 炉冷 至 830℃ 水淬, 230℃ 回火	中心	572	430	30	67.7	—
≤50	930℃ 渗碳, 800℃ 水淬, 180 ~ 200℃ 回火	中心	500 ~ 600	280 ~ 350	≥18	≥45	表面 56 ~ 62HRC, 心 部 145 ~ 160HBW

表 12-24 20Mn2B 钢渗碳后的抗弯强度和冲击韧度

热处理制度	试样尺寸 /mm	支点距离 /mm	HRC	渗碳层深度 /mm	弯断负荷 /kN	挠度 f /mm	a_K /J·cm ⁻²
渗碳 6h, 880 ~ 900℃ 油淬, 780℃ 油淬, 200℃ 回火	15 × 15 × 120	100	52	1.17	46.90	2.25	33
渗碳 6h, 880 ~ 900℃ 正火, 780℃ 油淬, 200℃ 回火	15 × 15 × 120	100	65	1.17	44.50	2.30	
渗碳 6h, 860℃ 油淬, 200℃ 回火	15 × 15 × 120	100	56	1.17	56.00	2.30	18.5

表 12-25 20MnVB 钢伪渗碳处理后的力学性能

热处理毛 坯直径 /mm	热处理制度	σ_b	σ_s	δ_5	ψ	a_K	备注
		/MPa		(%)		/J·cm ⁻²	
25	930℃ 伪渗碳 6h, 780 ~ 800℃ 油淬, 180 ~ 200℃ 回火	920	620		21	36	①
	930℃ 伪渗碳 6h, 800 ~ 820℃ 油淬, 180 ~ 200℃ 回火	1320		7	20	75	
	930℃ 伪渗碳 6h, 820 ~ 840℃ 油淬, 180 ~ 200℃ 回火	1530		11.5	45	130	
	930℃ 伪渗碳 6h, 840 ~ 860℃ 油淬, 180 ~ 200℃ 回火	1540		12	50	120	
	930℃ 伪渗碳 6h, 860 ~ 880℃ 油淬, 180 ~ 200℃ 回火	1530		12.5	43	150	
	930℃ 伪渗碳 8h, 降温至 930℃ 10min 油淬, 200℃ 回火	1430	1140	12	39.5	85	②
	930℃ 伪渗碳 8h, 降温至 850℃ 10min 油淬, 200℃ 回火	1470	1180	12	50	86	
	930℃ 伪渗碳 8h, 降温至 825℃ 10min 油淬, 200℃ 回火	1460	1200	12.5	52	90	
	930℃ 伪渗碳 8h, 降温至 800℃ 10min 油淬, 200℃ 回火	1475	1140	12.5	53.5	93	
	930℃ 伪渗碳 8h, 降温至 775℃ 10min 油淬, 200℃ 回火	1460	1230	13	53.0	90	

① 用钢成分 (质量分数) (%) C0.22, Si0.36, Mn1.19, V0.14, B0.002, P0.013, S0.010。

② 用钢成分 (质量分数) (%) C0.20, Si0.33, Mn1.00, V0.06, B0.0025, P0.018, S0.016, Ni < 0.10。

表 12-26 20MnVB 钢渗碳淬火后的力学性能

试验项目	试样尺寸/mm	热 处 理	试 验 结 果	硬度及层深
弯曲试验	15 × 15 × 100 跨距 80	930℃ 气体渗碳 150 ~ 180min, 840℃ 油 淬, 200℃ 回火 90min	破坏强度 2000MPa	表面硬度 59 ~ 61HRC 层深 0.93 ~ 1.02mm
缺口弯 曲试验	15.3 × 15.3 × 100 缺口深 0.3, 跨距 80		破坏强度 1860MPa	
冲击试验	15 × 15 × 100 无缺口, 跨距 80		冲击吸收功 166.5J	
薄片弯曲 试验	2 × 12 × 80 跨距 50		破坏强度 1900MPa	基本渗透 表面硬度 58 ~ 59HRC

表 12-27 20MnVB 钢渗碳处理后的静弯强度和冲击吸收功

热处理制度	渗碳层深/mm	硬 度		弯断载荷 P_{max}/kN	挠度 $f/0.03mm$ 时载荷/kN	屈服载荷 P_s/kN	缺口试样 断裂载荷, P_K/kN	P_K/P_{max}	薄片试样 弯断强度 /MPa	A_K/J
		表面 HRC	心部 HBW							
在连续式气体渗碳炉中渗碳 8h, 降温到 830℃ 保温 10min 油淬, 190℃ 90min 回火空冷	1.20	56	401	46.50	44.50	39.80	42	≥ 0.9	1794	55

注: 1. 光滑弯曲试样尺寸为 $15mm \times 15mm \times 100mm$, $l_0 = 80mm$; 缺口试样缺口深 $0.30mm$, $r = 0.2mm$, 张角 60° ; 薄片尺寸 $2mm \times 12mm \times 80mm$, $l_0 = 60mm$ 。
2. 冲击试样尺寸为 $15mm \times 15mm \times 100mm$, $l_0 = 80mm$;
3. 渗碳前钢的成分, (质量分数) (%): C0.20, Si0.33, Mn1.00, V0.06, B0.0025, P0.018, S0.016。

表 12-28 25MnTiB 钢渗碳后的抗弯强度

热处理制度	试样尺寸 /mm	渗碳层深度 /mm	硬度 HRC		抗弯强度/MPa		$\frac{\sigma_{bbK}}{\sigma_{bb}}$	备注
			表面	心部	σ_{bb}	σ_{bbK}		
910℃ 渗碳 4h, 降温到 790℃ 油淬, 180℃ 回火 90min 空冷	$15 \times 15 \times 120$ $l_0 = 100$	0.85	59 ~ 61	45 ~ 46	1863	1470	0.79	①
920℃ 渗碳 5h, 降温到 810℃ 油淬, 180℃ 回火 90min 空冷		1.23 ~ 1.26	58.5 ~ 59	42 ~ 43	1745	1540	0.88	②
920℃ 渗碳 5h 空冷, 重新加热到 850℃ 油淬, 180℃ 回火 90min 空冷		1.23 ~ 1.26	60 ~ 60.5	41.5 ~ 43	2115	1620	0.77	②

① 用钢成分 (质量分数) (%): C0.25, Si0.35, Mn1.53, Ti0.050, B0.0030, P0.014, S0.004。
② 用钢成分 (质量分数) (%): C0.20, Si0.28, Mn1.45, Ti0.073, B0.0028, P0.017, S0.006。

表 12-29 25MnTiB 钢渗碳淬火、回火后的力学性能

热处理制度	渗层深度 /mm		弯曲试验 $10mm \times 10mm \times 55mm$ 跨距 = 52.8mm		薄片弯曲试验 $2mm \times 2mm \times 80mm$ 跨距 = 50mm		冲击试验 $10mm \times 10mm \times 55mm$ (无缺口)
	共析层	总深	HRC	σ_{bb} /MPa	HRC	σ_{bb} /MPa	a_K /J·cm ⁻²
930℃ 气体渗碳 6h, 降温到 840℃ 油淬, 200℃ 回火空冷	1.0	2.1	~ 55	2250	59 ~ 62	1750	17

表 12-30 25MnTiBRE 钢渗碳淬火后的力学性能

试验项目	试样尺寸/mm	热 处 理	试 验 结 果	
			(弯曲, 冲击, 疲劳) 强度	渗碳层深度/mm
弯曲试验	$10 \times 10 \times 120$	940℃ 渗碳, 降温到 860℃ 淬火, 180℃ 回火	弯曲强度 2415MPa	0.8 ~ 0.9
			弯曲强度 2115MPa	1.0 ~ 1.1
			弯曲强度 1825MPa	1.4 ~ 1.5
			弯曲强度 1900MPa	1.6 ~ 1.7
			弯曲强度 1695MPa	1.8 ~ 1.9

(续)

试验项目	试样尺寸/mm	热 处 理	试 验 结 果	
			(弯曲, 冲击, 疲劳) 强度	渗碳层深度/mm
冲击试验	10 × 10 × 50 无缺口	920℃ 渗碳降温到 820℃ 淬火, 180℃ 回火	冲击韧度 37J/cm ²	0.9 ~ 1.1
			冲击韧度 36J/cm ²	1.4 ~ 1.6
薄片弯曲试验	2 × 15 × 60 跨距 40	920℃ 渗碳降温到 820℃ 淬火, 180℃ 回火	弯曲强度 1580MPa	渗透
弯曲疲劳试验	HY12 型疲劳试验机, 试样 L = 80	920℃ 渗碳降温到 840℃ 淬火, 180℃ 回火	疲劳极限 660MPa	0.81

表 12-31 25MnTiB 钢伪渗碳后的力学性能

热处理毛坯尺寸 /mm	热处理制度	σ_b	σ_s	δ_5	ψ	a_K
		/MPa		(%)		/J·cm ⁻²
φ16	930℃ 伪渗碳 8h, 降温到 840℃ 油淬, 200℃ 回火空冷	1390	1170	11.2	56.0	78

注: 用钢成分 (质量分数) (%): C0.19, Si0.29, Mn1.66, Ti0.09, B0.0038, P0.007, S0.007。

表 12-32 20Mn2TiB 钢伪渗碳后降温到不同温度淬火后的力学性能

毛坯直径 /mm	热 处 理	力 学 性 能					
		σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 (%)	ψ (%)	a_K /J·cm ⁻²	HBW
15	930℃, 8h 油淬, 200℃ 回火	1530	1240	7.5	33.0	95	387
15	930℃, 8h, 降温到 825℃ 油淬, 200℃ 回火	1440	1250	11.5	50.5	110	364
15	930℃, 8h, 降温到 800℃ 油淬, 200℃ 回火	1440	1110	11.5	50.5	105	375
15	930℃, 8h, 降温到 775℃ 油淬, 200℃ 回火	1480	1140	12.0	50.5	105	375

表 12-33 20Mn2TiB 钢渗碳淬火后的力学性能

试验项目	试样尺寸/mm	热 处 理	试 验 结 果	硬度及渗层深度
弯曲试验	15 × 15 × 100 跨距 80	连续式气体渗碳炉渗碳, 900 — 970 — 910 — 830℃, 8h, 油淬, 200℃ 回火	破坏强度 2055MPa 屈服强度 1735MPa	表面硬度 57 ~ 59HRC 渗碳层深度 1.05mm, 心部硬度: 388HBW
缺口弯曲试验	15.3 × 15.3 × 100 缺口深 0.3 跨距 80		破坏强度 1700MPa	
冲击试验	15 × 15 × 100 无缺口 跨距 80		冲击吸收功 80 ~ 140J (平均 108J)	
薄片弯曲试验	2 × 12 × 80 跨距 50		破坏强度 2090MPa	基本渗透 表面硬度 57.5 ~ 59HRC 心部 46 ~ 53HRC

表 12-34 20Mn2MoB 钢伪渗碳淬火后的力学性能

热处理毛坯 直径/mm	热处理制度			σ_b	σ_s	δ_5	ψ	a_K	硬度
	伪 渗 碳	淬 火	回 火	/MPa		(%)		/J·cm ⁻²	HBW
15 和 15×15 方	930℃ 8h, 降温至 淬火温度保温 10min	930℃ 油冷	200℃	1350	1150	14.0	59.5	94	383
		900℃ 油冷	60min	1330	1125	13.5	59.0	104	378
		875℃ 油冷	空冷	1340	1153	14.0	59.5	96	381
		850℃ 油冷		1390	1190	14.0	59.0	100	387
		825℃ 油冷		1320	1103	14.3	60.0	87	375
		800℃ 油冷		1340	1133	14.3	58.3	92	382
		775℃ 油冷		1210	973	12.0	37.0	35	350

注: 用钢成分(质量分数)(%): C0.21, Si0.22, Mn1.10, Mo0.21, B0.0016, P0.032, S0.012。

表 12-35 20Mn2MoB 钢渗碳淬火后的抗弯强度

热处理制度	有渗碳层的试样的静弯曲强度						
	层深 /mm		硬度 HRC		光滑试样, 15mm × 15mm × 100mm $l_0 = 80\text{mm}$		
	总深	共析层	表面	心部	P_{\max}/kN	$P_{0.03}/\text{kN}$	P_s/kN
930℃ 气体渗碳 13h, 降温至 830℃ 保温 10min 油淬, 190℃ 90min 回火空冷	1.2 ~ 1.24	0.66 ~ 0.70	58.5 ~ 60	HBW ≈ 364	约 54	约 50	约 36

热处理制度	有渗碳层的试样的静弯曲强度		薄片渗碳试样静强度			
	缺口试样 $r = 0.2\text{mm}$	冲击吸收功 A_K/J	2mm × 11.5mm × 80mm $l_0 = 50\text{mm}$			
	P_{\max} /kN		硬度 HRC		σ_{bb} /MPa	
			表面	心部		
930℃ 气体渗碳 13h, 降温至 830℃ 保温 10min 油淬, 190℃ 90min 回火空冷	约 42.5	51 ~ 84	57 ~ 59	56 ~ 58	171 ~ 207	

表 12-36 20SiMnVB 钢伪渗碳淬火后的力学性能

毛坯尺 寸直径 /mm	热处理制度	σ_b	σ_s	δ_5	ψ	a_K	HRC
		/MPa		(%)		/J·cm ⁻²	
15	940℃ 伪渗碳 6h50min 降温至						
	880℃ 油淬, 200℃ 回火	1433	1140	12	54.5	102	39.6
	860℃ 油淬, 200℃ 回火	1440	1097	11	54.3	79	39.0
	840℃ 油淬, 200℃ 回火	1458	1123	11	53.0	81	39.0
	820℃ 油淬, 200℃ 回火	1432	1138	12	54.2	105	36.0
19	940℃ 伪渗碳 7h20min, 重新加热至						
	880℃ 油淬, 200℃ 回火	1410	1260	13.5	54.0	128	42
	870℃ 油淬, 200℃ 回火	1417	1127	12.3	56.2	109	43
	920℃ 油淬, 830℃ 油淬 210℃ 回火	1500	1235	11	48	97	44
	920℃ 油淬, 800℃ 油淬 210℃ 回火	1150	870	18.5	43	119	29.5
	920℃ 油淬, 780℃ 油淬 210℃ 回火	1020	635	19	48.5	112	29.0

表 12-37 20SiMnVB 钢渗碳淬火后的抗弯强度

热处理制度	渗层深度/mm	硬度 HRC		光滑静弯曲 15mm × 15mm × 150mm $l_0 = 100\text{mm}$		缺口静弯曲 15mm × 15mm × 150mm $l_0 = 100\text{mm}$		缺口冲击 15mm × 15mm × 150mm /J·cm ⁻²
		表面	心部	σ_{bb} /MPa	f /mm	σ_{bb} /MPa	f /mm	
940℃ 渗碳 6h50min, 降温至:								
880℃ 油淬, 200℃ 回火	1.30	57.5	43	1913	1.55	1662	1.06	28
860℃ 油淬, 200℃ 回火	1.30	60.5	43.7	2022	1.70	1692	3.11	31
840℃ 油淬, 200℃ 回火	1.30	60.0	43.0	1958	1.53	1522	0.85	24
820℃ 油淬, 200℃ 回火	1.30	60.0	44.5	1890	1.59	1554	0.88	21
940℃ 渗碳 7h20min, 重加热至:								
880℃ 油淬, 200℃ 回火	1.52	59.5	41.0	2571	1.13	1602	0.75	30
860℃ 油淬, 200℃ 回火	1.52	57.5	43.0	2695	1.17	1670	0.82	35

表 12-38 23SiMn2Mo 钢渗碳淬火后的力学性能

热处理制度	渗碳层深/mm		硬度 HRC		弯曲试验		缺口弯曲试验	$\frac{\sigma_{bbK}}{\sigma_{bb}}$	冲击吸收功	薄片弯曲试验
	总深	共析层	表面	心部	P_{max} /kN	f /mm	P_{max} /kN		A_K /J	σ_{bb} /MPa
940℃ 气体渗碳, 温度下降到 840 ~ 850℃ 油淬; 再加热到 780 ~ 800℃ 油淬, 200℃ 回火空冷	2.4 ~ 2.5	1.5 ~ 1.7	61.5 ~ 63.5	32 ~ 37	45.73	2.49	40.70	0.89	69	2600

注: 1. 光滑弯曲试样 15mm × 15mm × 100mm, 跨距 80mm。

2. 缺口弯曲试样 15mm × 15.3mm × 100mm, 缺口深 0.3mm, $r = 0.2\text{mm}$ 。

3. 冲击试样 15mm × 15mm × 100mm。

4. 薄片弯曲试样 3mm × 12mm × 80mm。

表 12-39 23SiMn2Mo 钢伪渗碳淬火后的力学性能

热处理制度	σ_b	σ_s	δ_5	ψ	a_K /J·cm ⁻²	备注
	/MPa		(%)			
950℃ 伪渗碳 8h, 降温到 780℃ 油淬, 200℃ 回火, 空冷	1550	1265	12	46	89	①
	1685	1355	11	45	80	②

① 用钢成分 (质量分数) (%): C0.21, Si0.86, Mn1.75, Mo0.28, Cr0.03, Ni0.03。

② 用钢成分 (质量分数) (%): C0.26, Si1.21, Mn1.81, Mo0.26, Cr0.03, Ni0.03。

表 12-40 15Cr 钢渗碳淬火后的力学性能

热处理毛坯 直径/mm	热处理制度	取样 部位	σ_b	σ_s	δ_5	ψ	a_K
			/MPa		(%)		/J·cm ⁻²
25	925℃ 6h 渗碳, 降温到 875℃ 直接淬水, 200℃ 90min 回火空冷	中心	945	795	15	43	94
6.5	925℃ 6h 渗碳, 降温到 875℃ 直接淬水, 200℃ 90min 回火空冷	中心	1200	1100	10	40	

注: 用钢成分 (质量分数) (%): C0.15, Si0.27, Mn0.51, Cr0.74, Ni0.28, P0.007, S0.007。

表 12-41 20Cr 钢伪渗碳淬火后的力学性能

热处理毛坯 直径/mm	热处理制度	σ_b	σ_s	δ	ψ	a_K
		/MPa		(%)		/J·cm ⁻²
25	950℃空冷, 860℃40min 油淬, 200℃90min 回火空冷	1009	629	17	58.0	92
	925℃伪渗碳 6h, 降温 875℃淬火 200℃回火	1240	1060	9.5	32	55

表 12-42 20Cr 钢渗碳和伪渗碳淬火后的弯曲强度

热处理制度	静弯曲负荷/kN				薄片试样弯曲强度			a_K /J·cm ⁻²
	P_{max}	$P_{0.03}$	P_s	P_K	表面 HRC	心部 HRC	σ_{bb} /MPa	
930℃10h 渗碳, 降温到 830℃10min, 油淬, 190℃90min 回火	58	45.3	35.5	34.5	59	53.5	1890	52
930℃8h 伪渗碳, 降温到 850℃保温 10min, 油淬, 200℃60min 回火		31.5	25					

注: 1. P_{max} —断裂负荷, $P_{0.03}$ —挠度为 0.03mm 时负荷, P_s —屈服负荷, P_K —缺口试样的断裂负荷 (缺口深 0.3mm, $r = 0.2mm$, $\alpha = 60^\circ$)。
2. 弯曲试样尺寸, 15mm×15mm×100mm, 薄片试样尺寸 2mm×11.5mm×80mm。

表 12-43 20CrMnMo 钢渗碳淬火后的抗弯强度

热处理制度	试样尺寸 /mm	不同渗层深度 (mm) 的 σ_{bb} /MPa ^①				试样尺寸 /mm	不同渗层深度 (mm) 的 a_K /J·cm ⁻² ^②	
		0.8~0.9	1.0~1.1	1.4~1.5	1.6~1.7		0.9~1.1	1.4~1.6
940℃渗碳, 降温到 860℃油淬, 180℃回火	10×10×120 $l_0 = 100$	2260	2025	1825	1770	10×10×55	39	21
940℃渗碳, 重加热 860℃油淬, 180℃回火	10×10×120 $l_0 = 100$	3010	2700	2430	2360			

注: 静弯和冲击均为无缺口试样; 冲击试样经过 920℃渗碳, 降温到 820℃油淬, 180℃回火。
① 用钢成分 (质量分数) (%): C0.22, Si0.28, Mn1.04, Cr1.23, Mo0.22, P0.013, S0.031。
② 用钢成分 (质量分数) (%): C0.21, Si0.34, Mn1.08, Cr1.13, Mo0.23, P0.021, S0.006。

表 12-44 几种铬锰钼钢渗碳后的冲击韧度

钢 号	碳含量 w_C (%)	冲击韧度/J·cm ⁻²		
		渗碳层深度/mm		
		0.70	1.00	1.25
15CrMnMo	0.18	29.6	27.9	15.2
20CrMnMo	0.23	32.7	29.7	7.0
25CrMnMo	0.27	29.5	21.4	7.4
30CrMnMo	0.30	—	23.3	2.7

表 12-45 20Cr2Mn2Mo 钢渗碳后的接触疲劳寿命

渗碳层深度/mm	破坏概率 (%)	接触应力/MPa	接触疲劳寿命 $N/\times 10^6$	HRC
0.90 ~ 1.10	10	7000	2.27	60 ~ 64
	50		7.45	

表 12-46 20CrMnTi 钢伪渗碳淬火后的力学性能

热处理毛坯 直径/mm	热处理制度	σ_b	σ_s	δ_5	ψ	a_K	
		/MPa		(%)		/J·cm ⁻²	
15	910℃伪渗碳 8h,	840℃油淬, 200℃回火	1300	1060	11	50	160
		850℃油淬, 200℃回火	1300	1060	12.4	52	150
		870℃油淬, 200℃回火	1320	1150	12	45	127
	930℃伪渗碳 8h,	840℃油淬, 200℃回火	1270	1090	10	55	137
		850℃油淬, 200℃回火	1222	1030	11.2	55	125
		870℃油淬, 200℃回火	1380	1180	12	61	136
	950℃伪渗碳 8h,	840℃油淬, 200℃回火	1340	1180	13	56	135
		850℃油淬, 200℃回火	1300	1080	11.6	59	103
		870℃油淬, 200℃回火	1452	1180	12.6	54	138
	930℃伪渗碳 8h, 降温至:						
	930℃油淬, 200℃回火		1138	895	15.3	54	112
	900℃油淬, 200℃回火		1080	875	16.0	62.5	141
	875℃油淬, 200℃回火		1128	898	17.0	58.0	133
	850℃油淬, 200℃回火		1145	885	17.0	59.3	155
	825℃油淬, 200℃回火		1213	955	14.3	58.0	130
	800℃油淬, 200℃回火		1150	888	14.0	46.8	116
	775℃油淬, 200℃回火		1028	753	11.8	35.8	74

表 12-47 20CrMnTi 钢伪渗碳后不同温度淬火的抗弯强度

淬火温度/℃	880	860	830	800	780	760	740
硬度 HRC	43	41	41	41	40	38	32
σ_{bb} /MPa	4470	4370	3630	3460	3680	3735	2990

注: 1. 用钢成分(质量分数)(%): C0.21, Si0.35, Mn0.99, Cr1.08, Ti0.064, P0.012, S0.006。
2. 试样尺寸: 10mm×10mm×120mm, 支点 100mm。
3. 900℃伪渗碳后油淬, 180℃回火。

表 12-48 20CrMnTi 钢渗碳处理后的抗弯强度和冲击韧度

热 处 理 制 度	项 目 渗碳层深/mm	10mm × 10mm × 120mm, $l_0 = 100\text{mm}$ σ_{bb}/MPa				10mm × 10mm × 50mm $a_K/\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$	
		0.8 ~ 0.9	1.0 ~ 1.1	1.4 ~ 1.5	1.6 ~ 1.7	0.9 ~ 1.1	1.4 ~ 1.6
940℃ 渗碳降温到 860℃ 油淬, 180℃ 回火		2060	1785	1740	1620	3.0	2.1
940℃ 渗碳、重加热到 860℃ 油淬, 180℃ 回火		2760	2380	2320	2160		

注: 1. 用钢成分(质量分数)(%): C0.21, Si0.35, Mn0.99, Cr1.08, Ti0.064, P0.012, S0.006。
2. 无缺口冲击试样经 920℃渗碳降温到 820℃油淬, 180℃回火。

表 12-49 20CrMnTi 钢渗碳薄层试样的抗弯强度和扭转强度

热处理制度	渗碳 层深 /mm	硬度 HRC		2mm×12mm ×55mm		2mm×15mm ×60mm		空心试样 扭转试验		备注
		表面	心部	σ_{bb} /MPa	f /mm	σ_{bb} /MPa	f /mm	τ_{max} /MPa	α / (°)	
940℃ 渗碳, 870℃ 油淬, 200℃ 回火	1.87	60.5		1658	3.7					①
940℃ 渗碳, 降温 850℃ 油淬, 200℃ 回火	1.62	56.6		1780	4.14					①
940℃ 渗碳 11h, 降温到 820℃ 10min 油淬, 200℃ 120min 回火	1.66	61				1345				
940℃ 渗碳 6h50min, 降温至 840℃ 10min 油淬, 200℃ 120min 回火	1.5	81 ^②	40			1459	3.2	1692	41.7	
940℃ 渗碳 7h20min, 860℃ 油淬, 200℃ 120min 回火	1.56	79 ^②	40			2395	6.0	1900	72	

① 用钢成分 (质量分数) (%) : C0.20 ~ 0.24, Si0.30 ~ 0.36, Mn0.95 ~ 1.02, Cr1.14 ~ 1.23, Ti0.072 ~ 0.12, P0.014 ~ 0.016, S0.002 ~ 0.003 数据为四个试样的平均值。
② 为 HRA 值。

表 12-50 18CrMnTi、20 钢、20Cr 液体渗碳速度^①

渗碳时间/h	渗碳层深度 (920 ~ 940℃) /mm ^②		
	18CrMnTi	20 钢	20Cr
1	0.55 ~ 0.65	0.30 ~ 0.40	0.55 ~ 0.65
2	1.00 ~ 1.10	0.70 ~ 0.75	0.90 ~ 1.00
3	1.42 ~ 1.52	1.00 ~ 1.10	1.40 ~ 1.50
4	1.56 ~ 1.64	1.28 ~ 1.34	1.56 ~ 1.62
5	1.80 ~ 1.90	1.40 ~ 1.50	1.80 ~ 1.90

① 无毒盐浴配方: 渗碳剂 (含 0.280 ~ 0.154mm, 木炭粉 70%, 30% NaCl): 10 份; K₂Cr₂O₇: 40 份; KCl: 40 份; Na₂CO₃: 10 份。
② 表面碳浓度为 w_c 0.90% ~ 1.00%。

表 12-51 15CrMn2SiMoA 钢渗碳后不同温度淬火的硬度

热 处 理 制 度		硬 度 HRC	
		表 面	心 部
920℃ 渗碳 10h, 816℃ 油淬, 200℃ 回火空冷	淬火后经 -80℃ 冷处理 未经冷处理	64.5 ~ 65 60.5 ~ 61	45 ~ 46.5 45 ~ 46
920℃ 渗碳 10h, 816℃ 空淬, 200℃ 回火空冷	淬火后经 -80℃ 冷处理 未经冷处理	63.5 ~ 64 61 ~ 62	39 ~ 41 38.5 ~ 39.5
920℃ 渗碳 10h, 786℃ 油淬, 200℃ 回火空冷	淬火后经 -80℃ 冷处理 未经冷处理	64 ~ 65 61.5 ~ 63	43.5 ~ 44.5 43.5 ~ 45
920℃ 渗碳 10h, 786℃ 空淬, 200℃ 回火空冷	淬火后经 -80℃ 冷处理 未经冷处理	63 ~ 64 61.5 ~ 63	35.5 ~ 37 33.5 ~ 38

表 12-52 15CrMn2SiMoA 钢渗碳层表面硬度与回火温度的关系

回火温度/℃	150	170	190	210
硬度 HRC	60.6	59.7	57.5	56.5

表 12-53 12CrNi2A 钢伪渗碳淬火后的力学性能

热处理毛坯 直径/mm	热处理制度	σ_b	σ_s	δ_5	ψ	a_K
		/MPa		(%)		$/J \cdot cm^{-2}$
15	940℃伪渗碳 7h, 870℃油淬, 200℃回火空冷	890	604	19	61.5	150
	940℃伪渗碳 7h, 890℃、780℃两次油淬, 200℃回火空冷	840	500	22	60.0	170

表 12-54 12CrNi2A 钢渗碳淬火后的抗弯强度和疲劳强度

热 处 理 制 度	渗碳层深度 /mm	表面硬度 HRC	弯曲试验 ^①		σ_b	σ_s	σ_{-1}	备注
			P/kN	f/mm	/MPa		/MPa	
940℃渗碳 7h, 870℃油淬, 200℃回火, 空冷	2.0	61	2480	1.65				
940℃渗碳 5h, 870℃油淬, 200℃回火, 空冷	1.7	61.5	2560	1.65			750	
940℃伪渗碳 7h, 870℃油淬, 200℃回火, 空冷					890	604	430	②
860℃油淬, 580℃回火					960		330	③

① 试样尺寸为 13.5mm × 13.5mm × 104mm, 跨距 80mm。

② 用钢成分(质量分数)(%): C0.12, Si0.32, Mn0.44, Cr0.78, Ni1.73, P0.015, S0.019; 莫尔型试样。

③ 用钢成分(质量分数)(%): C0.16, Si0.38, Mn0.55, Cr0.55, Ni2.08。

表 12-55 12CrNi2A 钢伪渗碳淬火后的低温冲击韧度

热处理制度	下列试验温度(℃)时的 $a_K/J \cdot cm^{-2}$			
	0	-20	-40	-60
940℃伪渗碳 7h, 870℃油淬, 200℃回火空冷	150	140	125	120

注: 1. 用钢成分(质量分数)(%): C0.12, Si0.32, Mn0.44, Cr0.78, Ni1.73, P0.015, S0.019。

2. 数据为三个试样的平均值。

表 12-56 12CrNi2A 钢伪渗碳淬火后的力学性能

碳含量 w_C (%)	热 处 理 制 度		σ_b	σ_s	δ_5	ψ	a_K	HRC	备注
			/MPa		(%)		$/J \cdot cm^{-2}$		
0.10	900℃伪渗碳 6h, 缓冷	850℃加热, 于 180℃等温淬火	1193	1092	15.2	61.0	147	33~34	①
			1173	1100	14.4	64.0	150	33	
			1155	1062	14.0	64.0	155	34.5	
		830~850℃重加热油淬, 160℃回火	902	812	16.8	68.9	168	28.5	
			1062	960	14.4	64.0	151	29.2	
			1054	940	14.0	61.0	154	29.5	
0.16	900℃伪渗碳 6h, 缓冷	850℃加热, 于 180℃等温淬火	1360	1248	12.8	59.0	124	38.8	②
			1338	1220	12.8	59.0	125	37.0	
			1390	1265	13.2	59.0	98	38.0	
			1202	1082	14.0	64.0	>180	34	
		760℃重加热油淬, 160℃回火	1155	1033	13.6	68.9	>180	33	
			1140	1018	14.0	70.8	>180	33	

(续)

碳含量 w_c (%)	热 处 理 制 度		σ_b	σ_s	δ_5	ψ	a_K	HRC	备注
			/MPa		(%)		/J·cm ⁻²		
0.13	940℃ 伪渗碳 7h, 缓冷	870℃ 重加热油淬, 200℃ 回火	113.0	91	15	59	15	35	③
		890℃、780℃ 两次油淬, 200℃ 回火	100	70	18	60	18	31	

① 用钢成分 (质量分数) (%): C0.10, Mn0.35, Cr0.71, Ni2.81, P、S 合格。

② 用钢成分 (质量分数) (%): C0.16, Mn0.43, Cr0.83, Ni2.87, P、S 合格。

③ 用钢成分 (质量分数) (%): C0.13, Si0.35, Mn0.46, Cr0.71, Ni2.88, P0.012, S0.011。

表 12-57 12Cr2Ni4A 钢伪渗碳淬火后的力学性能

热处理毛坯直径 /mm	热 处 理 制 度		σ_b	σ_s	δ_5	ψ	a_K	HRC	备注
			/MPa		(%)		/J·cm ⁻²		
16	900℃ 伪渗碳 6h, 850℃ 加热, 于 280℃ 等温淬火		1164	1067	14.7	70.8	164	35.1	①
	900℃ 伪渗碳 6h, 760℃ 油淬, 160℃ 回火 120min 空冷		1208	1094	15.3	67.2	143	36	
	900℃ 伪渗碳 6h, 800℃ 油淬, 160℃ 回火 120min 空冷						139	36.5	
16	900℃ 伪渗碳 6h, 850℃ 加热, 于 330℃ 等温淬火		1310	1200	12.9	64.0	119	38	②
	900℃ 伪渗碳 6h, 740℃ 油淬, 160℃ 回火 120min 空冷		1269	1142	14.5	59.0	115	36	
15	950℃ 8h 伪渗碳, 降温到 780℃ 油淬, 780℃ 重加热油淬, 200℃ 120min 回火空冷		1322	1050	13.0	55.7	13.9		③

① 用钢成分 (质量分数) (%): C0.11, Mn0.38, Cr1.38, Ni3.69。

② 用钢成分 (质量分数) (%): C0.15, Mn0.46, Cr1.34, Ni3.36。

③ 用钢成分 (质量分数) (%): C0.13, Si0.16, Mn0.46, Cr1.49, Ni3.63。

表 12-58 12Cr2Ni4A 钢渗碳后的抗弯强度和冲击吸收功

热 处 理 制 度	弯曲试验（无缺口） 15mm × 15mm × 100mm 跨距 80mm			弯曲试验（有缺口） 15.3mm × 15.3mm × 100mm 跨距 80mm, $r = 0.2\text{mm}$	薄片弯曲试验 3mm × 12mm × 80mm 跨距 50mm	冲击试验 15mm × 15mm × 100mm
	P_{\max} (平均) /kN	σ_{bb} /MPa	f_{\max} (平均) /mm	P_{\max} (平均) /kN	P_{\max} (平均) /kN	A_K /J
940℃ 渗碳 12h, 降温到 840℃ 油 淬, 780 ~ 800℃ 油淬, 200℃ 回火 空冷	59.35 ^①		2.48	①	①	104 ^①
930℃ 渗碳 7h, 810 ~ 830℃ 油淬, 200℃ 回火空冷	30.94 ^② 36.70 ^②	755 900		43.5	2.8	

① 渗碳层深度为 2.2mm。

② 渗碳层深度为 1.5mm; 弯曲试样尺寸为 15mm × 15mm × 150mm, 支点跨距为 110mm。

表 12-59 12Cr2Ni4A 钢渗碳和伪渗碳淬火后的疲劳极限

热处理毛坯直径 /mm	热处理制度	σ_b	σ_s	σ_{-1}
		/MPa		/MPa
16	900℃6h 伪渗碳, 850℃加热, 于 330℃等温淬火	1310	1200	552
	900℃6h 伪渗碳, 740℃油淬, 160℃回火 120min 空冷	1270	1140	552
	810℃油淬, 200℃回火	1380	1160	530
	920℃渗碳 5h, 810℃油淬, 200℃回火			1080

表 12-60 20Cr2Ni4A 钢渗碳后的抗弯强度和冲击韧性

热 处 理 制 度	渗层深度 /mm	HRC		σ_{bb}	f	a_K
		表面	心部	/MPa	/mm	/J·cm ⁻²
渗碳后, 780℃油淬, 150℃回火	2.3	62	42.5	2666 ^①	3.1	49 ^②
渗碳后, 800℃油淬, 150℃回火	2.3	62	43.0	2764 ^①	3.2	58 ^②
820~830℃碳氮共渗, 油淬, 150℃回火空冷	约 0.8	55~56	44	2070 ^③		55

- ① 试样尺寸 15mm×15mm×150mm, $l_0=130$ mm, 无缺口。
② 冲击试样尺寸 10mm×10mm×55mm, 无缺口; 渗碳层深度 1.5mm。
③ 试样尺寸 15mm×15mm×100mm, $l_0=80$ mm, 无缺口。

表 12-61 20Cr2Ni4A 钢渗碳后的接触疲劳寿命

渗碳层深度 /mm	表面硬度 HRC	接触应力 /MPa	接触疲劳寿命 N/次	破坏率 (%)
0.9~1.1	60~64	7000	2.82×10^6	50
1.4	60~64	7000	11.77×10^6	50

表 12-62 18Cr2Ni4WA 钢渗碳和碳氮共渗后的力学性能

热处理制度	HRC		渗层深度/mm	弯 曲 试 验						冲击吸收功	
				光滑试样 15mm×15mm ×100mm 跨距 80mm			缺口试样 15.3mm×15.3mm ×100mm 缺口深 0.3mm, 跨距 80mm			薄片试样 2mm×2mm ×80mm 跨距 50mm	15mm×15mm ×100mm 无缺口 跨距 80mm
	表面	心部		σ_{bb}	σ_s	f	σ_{bb}	σ_s	f	σ_{bb}	A_K
				/MPa		/mm	/MPa		/mm	/MPa	/J
连续式气体渗碳炉 渗碳, 温度为 850— 940—900—840℃, 油淬, 重加热 800℃ 油淬, 200℃回火	56	42	1.20	2155	1730	0.23	1945	1580	0.17	1765	171
860℃ 碳氮共渗油 淬, 200℃回火	56	43	0.50	2385	1470	0.75	207.5	155.5	0.29		26.6

表 12-63 25CrMnMoTiBA 钢渗碳和碳氮共渗后的力学性能

热 处 理 制 度	渗层深度 /mm	a_K (无缺口) /J·cm ⁻²	σ_{bb}	σ_{-1}
			/MPa	
930℃渗碳, 850℃油淬, 140~180℃回火	0.9	24	1900	645 (>5×10 ⁶ 次)
860℃碳氮共渗 4h 油淬, 140~180℃回火	0.7	19	2240	

表 12-64 20Cr2Mn2SiMoA 钢渗碳后的抗弯强度和冲击韧度

热 处 理 制 度			渗碳层 深度 /mm	硬度 HRC		σ_{bb} /MPa	f /mm	a_K /J·cm ⁻²
渗 碳	淬 火	回 火		心 部	表 面			
渗 碳 剂: 90% 木 炭, 10% Na ₂ CO ₃ 940℃渗碳, 直接油冷, 600℃回 火 6h, 回火二次	800℃油冷	150℃空冷	2.3	41.5	62.0	2398	2.67	10.6 9.1
	820℃油冷	150℃空冷	2.3	42.0	63.0	2485	2.99	
	800℃油冷	150℃空冷	1.58	42.0	62.0			
	820℃油冷	150℃空冷	1.58	43.0	61.5			

注: 1. 抗弯强度试样尺寸: $\phi 15\text{mm} \times 150\text{mm}$, 支点间距为 130mm;

2. 冲击试样为无缺口的 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 55\text{mm}$ 。

表 12-65 G10CrNi3Mo (9310) 钢机车齿轮用丙烷或未稀释的碳氢化合物液体在井式炉
渗碳时的作业条件 (渗碳温度 925℃, 炉罐直径 635mm、深 914mm)

到 $w_c 0.4\%$ 处 的有效层深 /mm	时间/h		加 热		渗 碳		扩 散		冷 却 ^①	
	渗碳	扩散	丙烷 /m ³ ·h ⁻¹	液体 /L·h ⁻¹	丙烷 /m ³ ·h ⁻¹	液体 /L·h ⁻¹	丙烷 /m ³ ·h ⁻¹	液体 /L·h ⁻¹	丙烷 /m ³ ·h ⁻¹	液体 /L·h ⁻¹
人工控制, 渗层深度低于 0.9mm ^②										
0.3	1	1/4	0.08 ~ 0.17	0.35	0.11	0.35	0.06	0.2	0.06	0.06
0.5	1	1/2	0.08 ~ 0.17	0.35	0.11	0.35	0.06	0.2	0.06	0.12
0.6	1 $\frac{1}{4}$	3/4	0.08 ~ 0.17	0.35	0.11	0.35	0.06	0.2	0.06	0.12
0.7	1 $\frac{1}{2}$	1	0.08 ~ 0.17	0.35	0.11	0.35	0.06	0.2	0.06	0.12
自动控制, 渗层深度大于 0.9mm					碳势调整					
					渗 碳		扩 散			
0.08 ~ 1.0	7½	2	0.08 ~ 0.17	0.35 ~ 0.47		1.15	0.9		0.08	0.12
1.0 ~ 1.3	10	3	0.08 ~ 0.17	0.35 ~ 0.47		1.15	0.9		0.08	0.12
1.3 ~ 1.5	12	4	0.08 ~ 0.17	0.35 ~ 0.47		1.15	0.9		0.08	0.12
1.5 ~ 1.8	20	5	0.08 ~ 0.17	0.35 ~ 0.47		1.15	0.9		0.08	0.12
1.8 ~ 2.0	24	6	0.08 ~ 0.17	0.35 ~ 0.47		1.15	0.9		0.08	0.12

① 炉温冷却到 760℃, 然后停止供给渗碳介质, 渗层深度小于 0.9mm 时, 继续炉冷到 595℃, 保温 2~6h (视随后续机械加工的实际情况而定)。如零件需在淬火前机械加工, 在 595℃保温 6h, 然后炉冷至 425℃。渗层深度大于 0.9mm 时, 继续炉冷到 595℃, 保温 6h, 再继续冷到 425℃, 然后卸料。

② 渗碳期是根据 140~230m² 渗碳表面积确定的, 如果炉料少于 140m² 加度金属, 超过 230m², 在渗碳和冷却时增加渗碳介质。

表 12-66 常用防渗碳涂料

涂料配方 (质量分数)	使用方法
氯化亚铜 2 份 } 铅 丹 1 份 } ^a 松 香 1 份 } 酒 精 2 份 } ^b	将 a、b 分别混合均匀后, 用 b 将 a 调成糊状, 用毛刷向工件防渗部位涂抹, 涂层厚度大于 1mm, 应致密无孔、无裂纹
熟耐火砖粉 40% 耐火粘土 60%	混合均匀后用水玻璃调配成干稠状, 填入轴孔处, 并捣实, 然后风干或低温烘干
(2mm) 玻璃粉 70% ~ 80%, 滑石粉 30% ~ 20%, 水玻璃适量	涂层厚度约 0.5 ~ 2mm, 涂后经 130 ~ 150℃ 烘干
硅砂 85% ~ 90%, 硼砂 1.5% ~ 2.0%, 滑石粉 10% ~ 15%	用水玻璃调匀后使用
铅丹 4%, 氧化铝 8%, 滑石粉 16%, 水玻璃 72%	调匀后使用, 涂敷两层, 此剂适用于高温防渗碳

表 12-67 渗碳件质量检查

检查项目	检查内容及方法	备 注
外观检查	表面有无腐蚀或氧化	
工件变形	检查工件的挠曲变形、尺寸及几何形状的变化	根据图样技术要求
渗层深度	宏观测量: 打断试样, 研磨抛光, 用硝酸酒精溶液浸蚀直至显示出深棕色渗碳层 用带有刻度尺的放大镜测量 显微镜测量: 渗碳后缓冷试样, 磨制成显微试样, 根据有关标准规定, 测量至规定的显微组织处。例如测至过渡区作为渗碳层深度等	在渗碳淬火后进行
硬度	包括渗层表面, 防渗部位及心部硬度。一般用洛氏硬度 HRC 标尺测量	在淬火后检查
金相组织	渗层碳化物的形态及分布, 残留奥氏体数量, 有无异常组织, 心部组织是否粗大及铁素体是否超出技术要求等, 一般在显微镜下放大 400 倍观察	按技术要求及标准进行

表 12-68 渗碳件常见缺陷及防止措施

缺陷形式	形成原因及防止措施	返修方法
表层粗大块状或网状碳化物	渗碳剂活性太高或渗碳保温时间过长 降低渗剂活性, 当渗层要求较深时, 保温后期适当降低渗剂活性	1. 在降低碳势气氛下延长保温时间, 重新淬火 2. 高温加热扩散后再淬火
表层大量残留奥氏体	淬火温度过高, 奥氏体中碳及合金元素含量较高 降低渗剂活性, 降低直接淬火或重新加热淬火的温度	1. 冷处理 2. 高温回火后, 重新加热淬火 3. 采用合适的加热温度, 重新淬火

(续)

缺陷形式	形成原因及防止措施	返修方法
表面脱碳	渗碳后期渗剂活性过分降低, 气体渗碳炉漏气。液体渗碳时碳酸盐含量过高。在冷却罐中及淬火加热时保护不当, 出炉时高温状态在空气中停留时间过长	1. 在活性合适的介质中补渗 2. 喷丸处理 (适用于脱碳层 $\leq 0.02\text{mm}$ 时)
表面非马氏体组织 (黑色组织)	渗碳介质中的氧向钢中扩散, 在晶界上形成 $\text{Cr} \cdot \text{Mn}$ 等元素的氧化物, 致使该处合金元素贫化, 淬透性降低, 淬火后出现黑色网状组织 (托氏体) 控制炉内介质成分, 降低氧的含量, 提高淬火冷却速度; 合理选择钢材	提高淬火温度或适当延长淬火加热保温时间, 使奥氏体均匀化, 并采用较快淬火冷却速度
反常组织	当钢中含氧较高 (沸腾钢), 固体渗碳时渗碳后冷却速度过慢, 在渗碳层中出现先共析渗碳体网的周围有铁素体层, 淬火后出现软点	提高淬火温度或适当延长淬火加热保温时间, 使奥氏体均匀化, 并采用较快淬火冷却速度
心部铁素体过多	淬火温度低, 或重新加热淬火保温时间不够	按正常工艺重新加热淬火
渗层深度不够	炉温低, 渗层活性低, 炉子漏气或渗碳盐浴成分不正常 加强炉温校验, 及炉气成分或盐浴成分的监测	补渗
渗层深度不均匀	炉温不均匀; 炉内气氛循环不良; 升温过程中工件表面氧化; 炭黑在工件表面沉积; 工件表面氧化皮等没有清理干净; 固体渗碳时渗碳箱内温差大及催渗剂拌和不均匀	报废或降级使用
表面硬度低	表面碳浓度低或表面脱碳; 残留奥氏体量过多, 或表面形成托氏体网	1. 表面碳浓度低者可进行补渗 2. 残留奥氏体多者可采用高温回火或淬火后补一次冷处理消除残留奥氏体 3. 表面有托氏体者可重新加热淬火
表面腐蚀和氧化	渗剂中的硫或硫酸盐, 催渗剂在工件表面熔化; 液体渗碳后工件表面粘有残盐、氧化皮、工件涂硼砂重新加热淬火等均引起腐蚀 工件高温出炉不当均引起氧化 应仔细控制渗剂及盐浴成分, 对工件表面及时清理及清洗	报废
开裂	渗碳后慢冷时组织转变不均匀所致, 如 18CrMnMo 钢渗碳后空冷时, 在表层托氏体下面保留了一层未转变的奥氏体, 后者在随后的冷却过程中或室温停留过程中转变为马氏体, 使渗层完成共析转变, 或加快冷却速度, 使渗层全部转变为马氏体加残留奥氏体	报废

12.3 渗氮工艺及性能 (表 12-69 ~ 表 12-124 和图 12-68 ~ 图 12-127)

1. 常用渗氮用钢及其预处理 (表 12-69 ~ 表 12-75)

表 12-69 常用渗氮钢的钢种

类别	钢 号	渗氮后的性能特点	主要用途及备注
低碳钢	08, 08Al, 10, 15, 20, Q195, Q235, 20Mn, 30, 35	抗大气与水腐蚀	螺栓、螺母、销钉、把手等零件
中碳钢	40, 45, 50, 60	提高耐磨、抗疲劳性能或抗大气及水的腐蚀性能	曲轴、齿轮轴、心轴、低档齿轮等零件
低碳合金钢	18Cr2Ni4WA, 18CrNiWA, 20Cr, 12CrNi3A, 12Cr2Ni4A, 20CrMnTi, 25Cr2Ni4WA, 25Cr2MoVA	耐磨、抗疲劳性能优良, 心部韧性高, 可承受冲击载荷	非重载齿轮、齿圈、蜗杆等中、高档精密零件
中碳合金钢	40Cr, 50Cr, 50CrV, 38CrMoAl, 38Cr2MoAlA, 35CrMo, 35CrNiMo, 35CrNi3W, 38CrNi3MoA, 40CrNiMo, 45CrNiMoV, 42CrMo, 30Cr3WA, 30CrMnSi, 30Cr2Ni2WAV	耐磨、抗疲劳性能优良, 心部强韧性好, 特别是含Al钢, 渗氮后表面硬度很高, 耐磨性很好	机床主轴、镗杆、螺套、汽轮机油、较大载荷的齿轮和曲轴等
模具钢	Cr12, Cr12MoV, 3Cr2W8V, 4Cr5MoVSi, 4Cr5MoV1Si, 4Cr5W2VSi, 5CrNiMo, 5CrMnMo	耐磨、抗热疲劳、热硬性好, 有一定的抗冲击疲劳性能	冷冲模、拉深模、落料模、有色金属压铸模、挤压模等
工具钢	W18Cr4V, W9Mo3Cr4V, CrWMn, W6Mo5Cr4V2, W18Cr4VCo5, 65Nb	耐磨性及热硬性优良	电池模具、高速钢铣刀、钻头等多种刀具
不锈钢、耐钢热、超高强钢	1Cr13, 2Cr13, 3Cr13, 4Cr13, 1Cr18Ni9Ti, 15Cr11MoV, 4Cr9Si2, 13Cr12NiWMoVA, 4Cr14Ni14W2Mo, 4Cr10Si2Mo, 17Cr18Ni9	耐磨性、热硬性及高温强度优良, 能在 500~600℃服役, 渗氮后耐蚀性有所下降, 但在许多介质中仍有较高的耐蚀性	纺纱机走丝槽, 在腐蚀介质中工作的泵轴、叶轮、中壳、内燃机气阀以及在 500~600℃环境下工作且要求耐磨的零件
含钛渗氮专用钢	30CrTi2, 30CrTi2Ni3Al	耐磨性优良, 热硬性及抗疲劳性能好	承受剧烈的磨粒磨损且无冲击的零件

表 12-70 渗氮层中各相的性质 (纯铁渗氮)

相	本质及化学式	晶体结构及晶格常数/mm	氮含量 (质量分数, %)	主要性能
α	含氮铁素体	体心立方: 0.2866 ~ 0.2877	590℃时达最大值 0.11, 室温下降至 0.004	具有铁磁性
γ	含氮奥氏体	面心立方	≤ 2.8	仅存在于共析温度之上, 硬度约为 160HV
γ'	以 Fe_4N 为基的固溶体 (Fe_4N)	面心立方 0.3971 ~ 0.3801	5.7 ~ 6.1	具有铁磁性, 脆性小, 硬度约为 550HV
ϵ	以 Fe_{2-3}N 为基的固溶体 (Fe_{2-3}N)	密排六方	4.55 ~ 11.0	脆性稍大, 耐蚀性较好, 硬度约为 265HV
ϵ	以 Fe_2N 为基的固溶体 (Fe_2N)	斜方	11.1 ~ 11.35	脆性大, 硬度约为 260HV

表 12-71 渗氮钢中氮化物的结构与基本特性

氮化物	氮含量 (质量分数, %)	晶体结构	硬度 HV	密度 / (g/cm ³)	分解温度 /℃	熔点 /℃
AlN	34.18	六方	1225 ~ 1230	3.05	1870	2400
TiN	21.1 ~ 22.6	面心立方	1994 ~ 2160	5.43	> 1500	3205
NbN	13.1 ~ 13.3	六方	1400	8.40	2300	—
Ta ₂ N	3.0 ~ 3.4	六方	1220	15.81	—	2050
TaN	5.8 ~ 6.5	六方	1060	14.36	—	3090
V ₃ N	8.4 ~ 11.9	六方	1900	5.98	—	—
VN	16.0 ~ 25.9	面心立方	1520	6.10	> 1000	2360
Cr ₂ N	11.3 ~ 11.8	六方	1570	6.51	—	1650
CrN	21.7	面心立方	1093	5.8 ~ 6.10	1500 (离解)	—
Mo ₃ N	5.4	正方	—	—	—	—
Mo ₂ N	6.4 ~ 6.7	面心立方	630	8.04	600 (离解)	—
MoN	12.73	六方	—	8.06	600 (离解)	—
W ₂ N	4.39	面心立方	—	12.20	800	—
WN	7.08	六方	—	12.08	600	—
Fe ₄ N	5.3 ~ 5.75	面心立方	≥ 450	6.57	670 (离解)	—
Fe ₃ N	8.1 ~ 11.1	六方	—	—	—	—
Fe ₂ N	11.2 ~ 11.8	正交	~ 260	—	560 (离解)	—

表 12-72 各种气体渗氮法的原理、特点和适用范围

渗氮方法	工艺过程	特 点	适用范围
一段渗氮	又称单程氮化。温度 480 ~ 530℃, 氮分解率 15% ~ 35%	温度低, 工件变形小, 硬高度 (1100 ~ 1200HV), 周期长 (30 ~ 80h), 渗层脆性较大	要求耐磨、变形小的零件
二段渗氮	又称双程氮化, 第一段温度 480 ~ 535℃, 第二段可以和第一段相同, 也可用 550 ~ 565℃, 第一段氮分解率 15% ~ 35%, 10h, 第二段 65% ~ 85%	渗速较大, 脆性较小, 周期比一段法短, 但硬度稍低 (900 ~ 1000HV)	要求硬度较高、脆性小、抗疲劳性能好的零件
三段渗氮	520℃保持使氮饱和, 560℃保持, 使氮向内扩散, 最后在较低温度保持, 使表面氮再度饱和以提高硬度	具有以上二种方法优点, 但工艺较复杂	要求硬度高、脆性小、抗疲劳性能好的重要零件
在 NH ₃ + N ₂ 混合气中的渗氮	混合气中含有体积分数为 N ₂ 70% ~ 90%, 其余与上同	分解出的活性氮原子少, 工件表面氮浓度较低, 渗层脆性小	要求硬度较高, 脆性小, 抗疲劳性能好的零件
抗蚀渗氮	550 ~ 560℃, 0.5 ~ 3h 氮分解率 20% ~ 70%, 以使工件表面获得 0.015 ~ 0.06mm 的 ε 相层	使钢表面获得致密的、化学稳定的 ε 相层	不一定只用于渗氮钢, 其他钢亦可用

表 12-73 结构钢渗氮前的调质规范

钢 号	淬 火		回 火		硬 度		备注
	温度/℃	冷却介质	温度/℃	冷却介质	HBW	HRC	
38CrMoAlA	940 ± 10	油、水	640 ± 30	空		27 ~ 34	大件淬水
38CrAl	930 ± 10	油、水	630 ± 10	水、油		28 ~ 33	大件淬水
38Cr	850 ~ 870	油、水	510 ~ 550	油、水		31 ~ 38	大件淬水
40Cr	840 ~ 860	油、水	570 ± 20	水		28 ~ 33	大件淬水
50CrVA	850 ~ 870	油	460 ± 20	水		43 ~ 49	
30CrMo	840 ~ 860	油	560 ± 10	空、油	≥ 241		
42CrMo	830 ~ 850	油	600 ± 20	空、油		28 ~ 35	
25Cr2MoVA	920 ~ 940	油	620 ± 10	空、油		28 ~ 33	
35CrMoV	840 ~ 860	油	600 ± 20	空、油	282		
40Cr2MoV	840 ~ 870	油	640 ± 20	空、油		30 ~ 35	
18Cr2Ni4WA	860 ~ 880	油	560 ± 20	空		30 ~ 35	
20CrMnTi	870 ~ 890	水、油	520 ~ 570			28 ~ 34	大件淬水
25CrNi4WA	860 ~ 880	油	540 ~ 580		302 ~ 321		
30CrMnSiA	890 ~ 910	油	500 ~ 540	水		37 ~ 41	
35CrNiMo	850 ~ 870	油	520 ~ 560	空	285 ~ 321		
40CrNiMoA	840 ~ 860	油	540 ~ 580	空		31 ~ 38	
45CrNiMoA	850 ~ 870	油	680 ± 20	空	269 ~ 277		
40CrNiMoVA	850 ~ 870	油	660 ~ 700	空	269		
30Cr3W	870 ~ 890	油	550 ~ 570			33 ~ 38	
40CrNi	840 ~ 860	油	540 ~ 560	水、油		28 ~ 32	

注：调质处理中的回火温度应高于渗氮温度至少 20 ~ 30℃。

表 12-74 常用不锈钢、耐热钢渗氮前的热处理规范

钢 号	淬火或退火		回 火		硬度 ^① (HBWd10/3000)
	温度/℃	冷却	温度/℃	冷却	
1Cr18Ni9Ti	1050 ~ 1100	水、油、空	—	—	—
1Cr13	1000 ~ 1050	油	680 ~ 780	油	3.9 ~ 4.5
4Cr10Si2Mo	980 ~ 1040	油	740	空	3.3 ~ 3.6
2Cr13	1000 ~ 1050	油	600 ~ 700	油、水	3.3 ~ 3.9
4Cr14Ni14W2Mo	1040 ~ 1060	水	780 ~ 820	空	3.7 ~ 4.3
	1040 ~ 1060	水	790 ~ 810	空	—
	810 ~ 830 (退火)	空	—	—	3.7 ~ 4.5
15CrMo	880 ~ 920	空	630 ~ 670	空	—
4Cr9Si2	980 ~ 1040	油	820	空	—
15Cr11MoV	1030 ~ 1050	油、空	670 ~ 740	空	3.8 ~ 4.2

① 渗氮前的硬度可不作具体规定，视零件强度而定。

表 12-75 常用渗氮钢的调质处理工艺及调质后的力学性能

材料	调质工艺			力学性能					备 注
	淬火温度 /℃	冷却 介质	回火温度 /℃	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ (%)	ψ (%)	α_K /J·cm ⁻²	
18Cr2Ni4WA	850 ~ 870	油	525 ~ 575	1170	1020	12	55	117	200 ~ 220HBW
20CrMnTi	910 ~ 930	油	600 ~ 620	—	—	—	—	—	
20Cr3MoWV	1030 ~ 1080	油	660 ~ 700	880	730	12	40	—	
30Cr3WA	870 ~ 890	油	580 ~ 620	980	830	15	50	98	
30CrMnSi	880 ~ 900	油	500 ~ 540	1100	900	10	45	50	200 ~ 220HBW
30Cr2Ni2WVA	850 ~ 870	油	610 ~ 630	980	830	12	55	117	
35CrMo	840 ~ 860	油	520 ~ 560	1000	850	12	45	80	
35CrAlA	920 ~ 940	油或水	620 ~ 650	880	740	10	45	78	
38CrMoAlA	920 ~ 940	油	620 ~ 650	980	835	15	50	88	
38CrWVA	900 ~ 950	油	600 ~ 650	980	835	12	50	88	
40Cr	840 ~ 860	油	500 ~ 540	1000	800	9	45	60	
40CrNiMo	840 ~ 860	油	600 ~ 620	1000	850	12	55	100	
40CrNiWA	840 ~ 860	油	610 ~ 630	1080	930	12	50	78	
50CrVA	850 ~ 870	油	480 ~ 520	1300	1150	10	40	—	
3Cr2W8V	1050 ~ 1080	油	600 ~ 620	1620	1430	11	38	34	52 ~ 54HRC
4Cr5MoV1Si	1020 ~ 1050	油	580 ~ 620	1830	1670	9	28	—	
5CrNiMo	840 ~ 860	油	540 ~ 560	1370	—	11	44	51	
Cr12MoV	980 ~ 1000	油	540 ~ 560	—	—	—	—	—	
W18Cr4V	1260 ~ 1310	油	550 ~ 570 (三次)	—	—	—	—	—	≥ 63HRC
W6Mo5Cr4V2	1200 ~ 1240	油	550 ~ 570 (三次)	—	—	—	—	—	≥ 63HRC
2Cr13	1000 ~ 1050	油或水	600 ~ 670	600	450	16	55	80	固溶处理
4Cr9Si2	1020 ~ 1040	油	700 ~ 780	900	600	19	50	—	
1Cr18Ni9Ti	1000 ~ 1100	水	—	550	200	40	55	—	
15Cr11MoV	930 ~ 960	空冷	680 ~ 730	450	240	21	61	60	
4Cr14Ni14W2Mo	820 ~ 850	水	—	706	314	20	35	—	

2. 常用渗氮工艺（图 12-68 ~ 图 12-127，表 12-76 ~ 表 12-111）

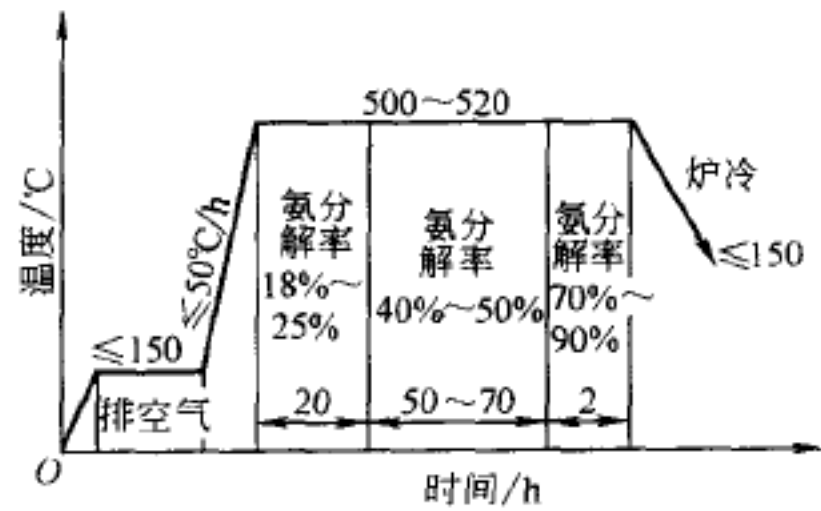


图 12-68 等温渗氮工艺曲线

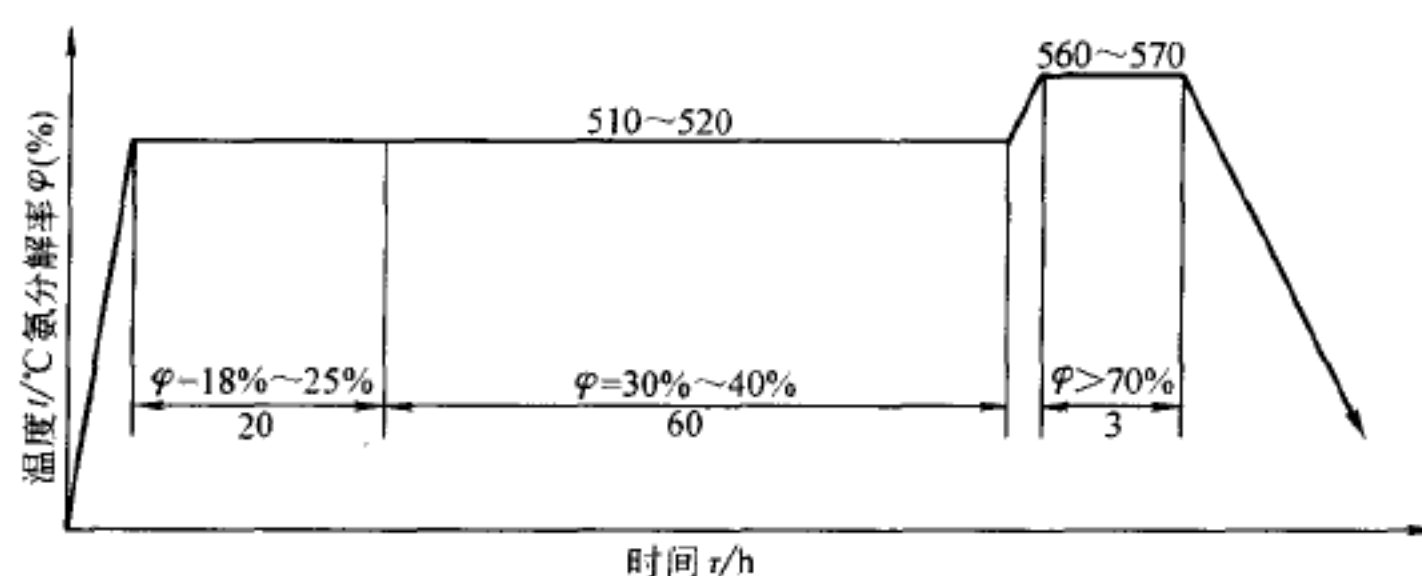


图 12-69 38CrMoAlA 钢一段渗氮工艺

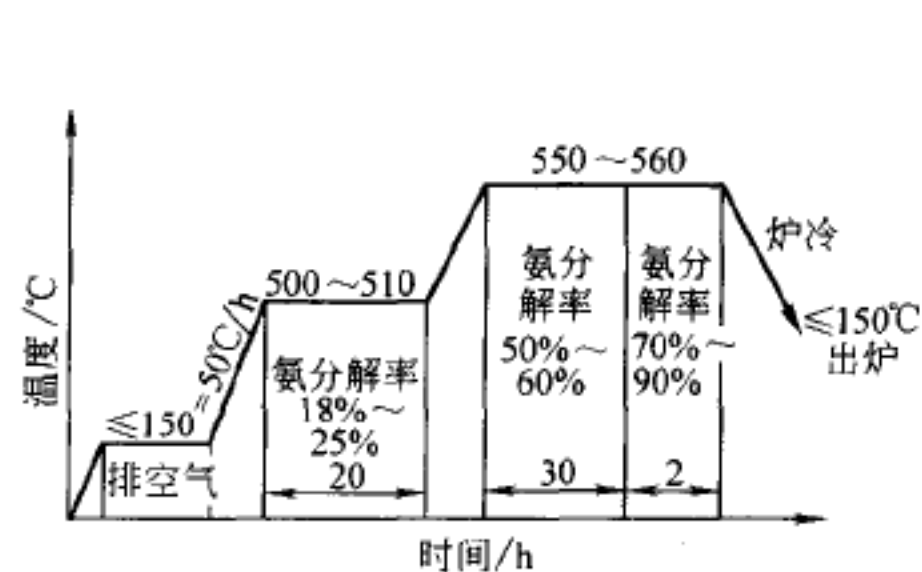


图 12-70 二段渗氮工艺曲线

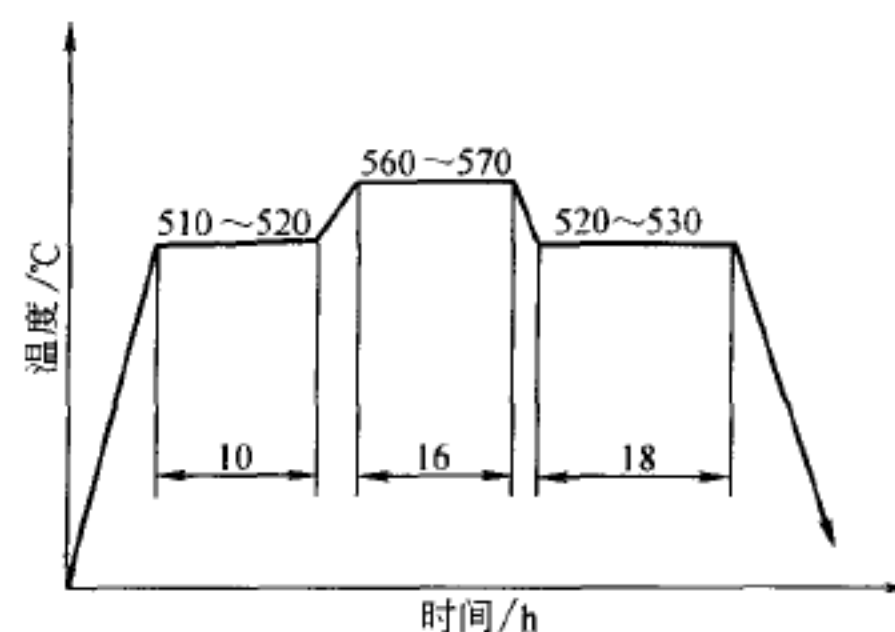


图 12-71 38CrMoAl 钢三段渗氮工艺曲线

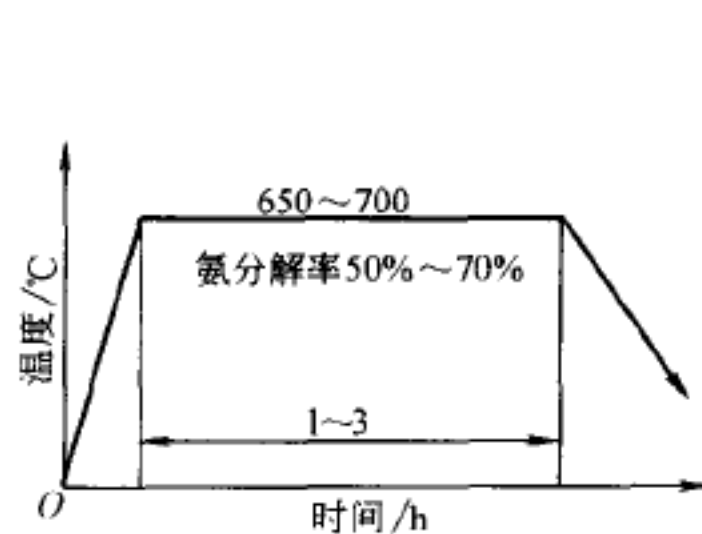


图 12-72 抗腐蚀渗氮工艺曲线

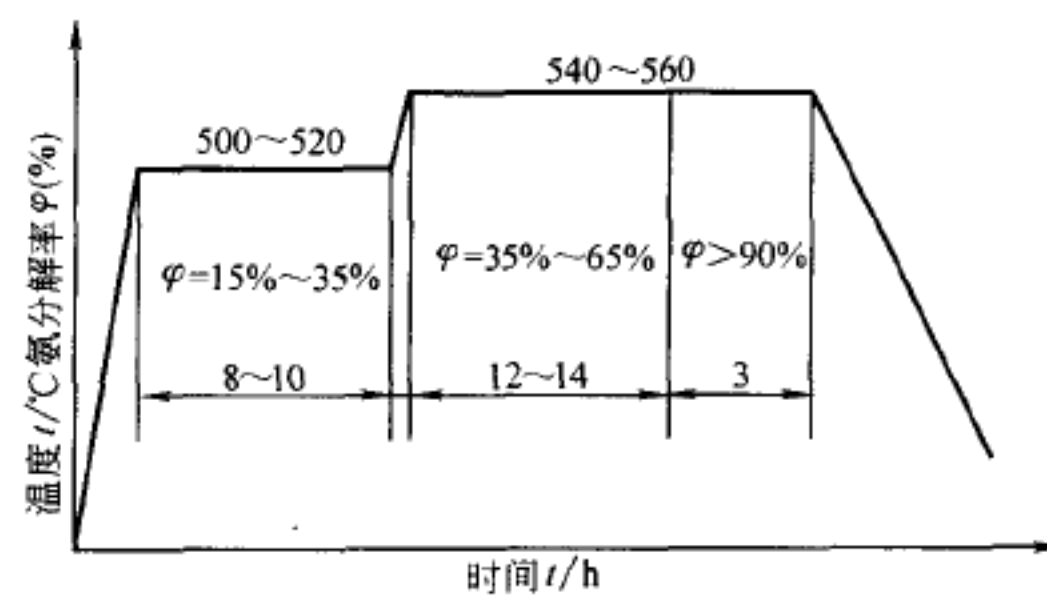


图 12-73 可控渗氮工艺

表 12-76 结构钢和工具钢气体渗氮工艺效果

材料	渗氮工艺参数				渗层深度 /mm	表面硬度	典型工件
	阶段	温度/°C	时间/h	氨分解率 (%)			
38CrMoAl		510 ± 10	17 ~ 20	15 ~ 35	0.2 ~ 0.3	> 550HV	卡块
		530 ± 10	60	20 ~ 50	≥ 0.45	65 ~ 70HRC	套筒
		540 ± 10	10 ~ 14	30 ~ 50	0.15 ~ 0.30	≥ 88HR15N	大齿圈
		510 ± 10	35	20 ~ 40	0.30 ~ 0.35	1000 ~ 1100HV	镗杆
		510 ± 10	80	30 ~ 50	0.50 ~ 0.60	≥ 1000HV	活塞杆
		535 ± 10	35	30 ~ 50	0.45 ~ 0.55	950 ~ 1100HV	

(续)

材料	渗氮工艺参数				渗层深度 /mm	表面硬度	典型工件	
	阶段	温度/℃	时间/h	氨分解率 (%)				
38CrMoAl		510 ± 10	35 ~ 55	20 ~ 40	0.3 ~ 0.55	850 ~ 950HV	曲轴	
		500 ± 10	50	15 ~ 30	0.45 ~ 0.50	550 ~ 650HV		
	1 2	515 ± 10 550 ± 10	25 45	18 ~ 25 50 ~ 60	0.40 ~ 0.60	850 ~ 1000HV	十字销、卡块	
	1 2	510 ± 10 550 ± 10	10 ~ 12 48 ~ 58	15 ~ 30 35 ~ 65	0.50 ~ 0.80	≥ 80HR30N	大齿轮、螺杆	
	1 2	510 ± 10 550 ± 10	10 ~ 12 48 ~ 58	15 ~ 35 35 ~ 65	0.5 ~ 0.8	≥ 80HR30N	气缸筒	
	1 2 3	510 ± 10 560 ± 10 560 ± 10	20 34 3	15 ~ 35 35 ~ 65 100	0.5 ~ 0.75	> 750HV		
	1 2	525 ± 5 540 ± 5	20 10 ~ 15	25 ~ 35 35 ~ 50	0.35 ~ 0.55	≥ 90HR15N		齿轮
	1 2	520 ± 5 600	19 3	25 ~ 45 100	0.35 ~ 0.55	87 ~ 93HR15N		
	1 2 3	510 ± 10 550 ± 10 550 ± 10	8 ~ 10 12 ~ 14 3	15 ~ 35 35 ~ 65 100	0.3 ~ 0.4	> 700HV		
	1 2	495 ± 5 525 ± 5	63 5	18 ~ 40 100	0.58 ~ 0.65	974 ~ 1026HV	螺杆	
	1 2 	510 + 10 550 + 10 550 + 10	25 35 2	18 ~ 25 50 ~ 60 > 80	0.5 ~ 0.7	> 900HV	镗杆齿轮	
	1 2 3 	520 ± 5 570 ± 5 530 ± 5 530 ± 5	10 16 18 2	20 ~ 25 40 ~ 60 30 ~ 40 > 80	0.4 ~ 0.6	> 1000HV		
	1 2	525 ± 5 540 ± 5	25 30 ~ 35	25 ~ 35 35 ~ 50	0.5 ~ 0.7	≥ 80HR30N	气缸套	
	30Cr2Ni2WA		500 ± 10	55	15 ~ 30	0.45 ~ 0.50	650 ~ 750HV	
	35CrNi3WA	1 2	505 ± 10 525 ± 10	40 50	15 40 ~ 60	≥ 0.7	> 45HRC	曲轴等
	40CrNiMo		520 ± 5	75	25 ~ 35	0.5 ~ 0.7	≥ 82HR15N	
		1	520 + 5	20	25 ~ 35	0.4 ~ 0.7	≥ 83HR15N	曲轴
		2	540 + 5	10 ~ 15	35 ~ 50			

(续)

材料	渗氮工艺参数				渗层深度 /mm	表面硬度	典型工件
	阶段	温度/℃	时间/h	氮分解率 (%)			
38Cr		510±5	55	18~25	0.55~0.6	71~78HRA	齿轮轴
	1	525±5	10~15	25~35	0.5~0.7	≥50HRC	齿轮轴
	2	540±5	25	35~50			
40Cr		510±5	55	18~23	0.55~0.6	77~78HRA	齿轮
	1	500±5	53	18~40	0.85	493~525HV	齿轮
	2	530±5	5	100			
30CrMnSiA		500±5	25~30	20~30	0.2~0.3	≥58HRC	
12Cr2Ni3A	1	500-10	53	18~40	0.69~0.72	503~599HV	齿轮
	2	540-10	10	100			
25CrNi4WA	1	520	10	25~35	0.2~0.4	≥73HRA	组合件
	2	550	10	45~65			
	3	520	12	50~70			
18Cr2Ni4WA		490-10	30	25~35	0.2~0.3	>600HV	齿轮
	1	490±5	35	18~45	0.43~0.47	690~724HV	曲轴
	2	510±5	10	100			
50CrVA		430-10	25~30	5~15	0.15~0.30		弹簧
		480±10	7~9	15~35	0.15~0.25		弹簧
35Cr3WA	1	500±5	40	15~25	0.4~0.6	60~70HRC	曲轴
	2	515±5	40	25~40			
45CrNiMoVA	1	520	10	25~35	0.2~0.6	≥73HRA	
	2	550	10	45~65			
	3	520	12	50~70			
35CrMo		520+10	60~70	50~60	0.6~0.7	560~680HV	曲轴
	1	505-5	24	18~30	0.5~0.6	687HV	
	2	515±5	26	30~50			
42CrMo		525±5	48	15~20	0.6~0.8	53~58HRC	
	1	520±5	63	18~40	0.39~0.42	493~599HV	齿轮轴
	2	530±5	5	100			
25Cr2MoV		500±5	30	15~35	0.3~0.35	680~721HV	齿轮
	1	490	77	15~22	0.3	681HV	
	2	480	7	15~22			
40Cr		490±10	24	15~35	0.20~0.30	≥550HV	齿轮
	1	520±10	10~15	25~35	0.50~0.70	≥50HRC	
	2	540±10	52	35~50			

(续)

材料	渗氮工艺参数				渗层深度 /mm	表面硬度	典型工件
	阶段	温度/℃	时间/h	氮分解率 (%)			
18CrNiWA		490 ± 10	30	25 ~ 30	0.20 ~ 0.30	≥600HV	轴
18Cr2Ni4A		500 ± 10	35	15 ~ 30	0.25 ~ 0.30	650 ~ 750HV	
3Cr2W8V		535 ± 10	12 ~ 16	25 ~ 40	0.15 ~ 0.20	1000 ~ 1100HV	模具
Cr12, Cr12MoV	1	480 ± 10	18	14 ~ 27	≥0.20	700 ~ 800HV	
	2	530 ± 10	22	30 ~ 60			
Cr18Si2Mo		570 ± 10	35	30 ~ 60	0.2 ~ 0.25	≥800HV	要求耐磨的 抗氧化件
W18Cr4V		515 ± 10	0.25 ~ 1	20 ~ 40	0.01 ~ 0.025	1100 ~ 1300HV	刀具

表 12-77 不锈钢和耐热钢气体渗氮工艺规范

材料	渗氮工艺参数				渗层深度 /mm	表面硬度	脆性等级
	阶段	温度/℃	时间/h	氮分解率 (%)			
Cr10Si2Mo		590	35 ~ 37	30 ~ 70	0.20 ~ 0.30	84HR15N	
1Cr13		500	48	18 ~ 25	0.15	1000HV	
		560	48	30 ~ 50	0.30	900HV	
2Cr13		500	48	20 ~ 25	0.12	1000HV	
		560	48	35 ~ 35	0.26	900HV	
1Cr13 2Cr13 15Cr11MoV	1	530	18 ~ 20	30 ~ 45	≥ 0.25	≥ 650HV	
	2	580	15 ~ 18	50 ~ 60			
1Cr18Ni9Ti		550 ~ 560	4 ~ 6	30 ~ 50	0.05 ~ 0.07	≥ 950HV	I - II
	1	540 ~ 550	30	25 ~ 40	0.20 ~ 0.25	≥ 900HV	I - II
	2	560 ~ 570	45	35 ~ 60			
2Cr18Ni8W2		560	24	40 ~ 50	0.12 ~ 0.14	950 ~ 1000HV	
		560	40	40 ~ 50	0.16 ~ 0.20	900 ~ 950HV	
		600	24	40 ~ 70	0.14 ~ 0.16	900 ~ 950HV	
		600	48	40 ~ 70	0.20 ~ 0.24	800 ~ 850HV	
4Cr14Ni14W2Mo		550 ~ 560	35	45 ~ 55	0.08 ~ 0.085	≥ 850HV	I - II
		580 ~ 590	35	50 ~ 60	0.10 ~ 0.11	≥ 820HV	
		630	40	50 ~ 80	0.08 ~ 0.14	≥ 80HR15N	
		650	35	60 ~ 90	0.11 ~ 0.13	83 ~ 84HR15N	

表 12-78 不锈钢纯氨渗氮工艺规范及效果

钢 号	渗 氮 工 艺			渗氮层深度 /mm	表面硬度 HV
	温度/℃	时间/h	氨分解率 (%)		
1Cr13	500	48	18 ~ 25	0.15	1000
	560	48	30 ~ 50	0.30	900
2Cr13	500	48	20 ~ 25	0.12	1000
	560	48	35 ~ 55	0.26	900
4Cr10Si2Mo	590	35 ~ 37	30 ~ 70	0.20 ~ 0.30	HR15N84
4Cr14Ni14W2Mo	560	35	45 ~ 55	0.08 ~ 0.09	HR15N 86 ~ 88
	630	40	50 ~ 80	0.08 ~ 0.14	HR15N ≥ 80
	580 ~ 590	35	50 ~ 60	0.10 ~ 0.11	≥ 820
1Cr18Ni9Ti	550 ~ 560	4 ~ 6	30 ~ 50	0.05 ~ 0.07	≥ 950
	第一段 540 ~ 550	30	25 ~ 40	0.20 ~ 0.25	≥ 900
	第二段 560 ~ 570	45	35 ~ 60		
2Cr18Ni8W2	560	24	40 ~ 50	0.12 ~ 0.14	950 ~ 1000
	560	40	40 ~ 50	0.16 ~ 0.20	900 ~ 950
	600	24	40 ~ 70	0.14 ~ 0.16	900 ~ 950
	600	48	40 ~ 70	0.20 ~ 0.24	800 ~ 850

表 12-79 抗蚀渗氮工艺规范

钢 号	渗氮温度/℃	渗氮时间/h	氨分解率 (%)	ε 相厚度/μm
电工纯铁	540 ~ 560	6	30 ~ 50	20 ~ 40
	590 ~ 610	3 ~ 4	30 ~ 60	20 ~ 40
10	590 ~ 610	6	45 ~ 70	40 ~ 80
20	600 ~ 620	3	50 ~ 60	17 ~ 20
40, 40Cr, 45, 50	590 ~ 610	2 ~ 3	35 ~ 55	15 ~ 50
	690 ~ 710	20 ~ 30min	55 ~ 75	15 ~ 50
T8、GCr15 ^①	770 ~ 790	同淬火加热时间	70 ~ 75	—
	810 ~ 840		70 ~ 80	—

① T8、GCr15 等钢的抗蚀渗氮常与淬火工艺结合在一起。

表 12-80 常用结构钢离子渗氮效果 (1)

钢 号	渗 氮 规 范		渗氮层深度 /mm	表 面 硬 度		
	温度/℃	时间/h		HV	HV	HR15N
38CrMoAlA	520	8	0.32	1164		
	540	8	0.32	998 ~ 1006		
	560	8	0.35	968 ~ 988		
	580	8	0.35	896 ~ 914		

(续)

钢 号	渗 氮 规 范		渗氮层深度 /mm	表 面 硬 度		
	温度/℃	时间/h		HV	HV	HR15N
18Cr2Ni4WA	450	5 ~ 6	0.2 ~ 0.25			91 ~ 93
	490 ~ 10	16	0.32	670 ~ 726		
35CrMo	480	12	0.3 ~ 0.35			82 ~ 84
42CrMo			0.38 ~ 0.62	550 ~ 650		
25Cr2MoVA	550	5	0.32	705		
40CrNiMoA	480	10	0.25 ~ 0.45			82 ~ 86
12CrNi3A	490	6 ~ 7	0.15 ~ 0.25			≥ 87
30CrMnSiA	430	3	0.15			84 ~ 86
45 钢	520	8		260 ~ 280		
30Cr3WA	480	15	0.25			93
18CrMnTi	420	2.5	0.10	730		
	460	3	0.15	738		
	500	2	0.09	689		
20Cr	500 ~ 520	2	0.25	566 ~ 666		
	520 ~ 560	10	0.40	524 ~ 633		
30CrMoV	450 ~ 560	6 ~ 7	0.3 ~ 0.45		743 ~ 967	
40Cr	480	8	0.35	613 ~ 633		
	500	8	0.35 ~ 0.40	566 ~ 593		
	520	8	0.35 ~ 0.40	613 ~ 633		
	560	8	0.4 ~ 0.45	566		

表 12-81 常用钢离子渗氮工艺和效果 (2)

钢号	温度/℃	时间/h	硬度 HV	渗层深度/mm
40Cr	500 ~ 520	8 ~ 10	500 ~ 650	> 0.3
20Cr	520 ~ 540	8	550 ~ 700	> 0.3
20CrMnTi	500 ~ 520	8	650 ~ 800	0.3 ~ 0.4
38CrMoAl	500 ~ 520	12	950 ~ 1100	0.4 ~ 0.5
	540 ~ 560	6	950 ~ 1100	0.4 ~ 0.5
W18Cr4V	480 ~ 500	1.5 ~ 2.0	1100 ~ 1200	0.05 ~ 0.06
	520 ~ 540	10 ~ 20min	950 ~ 1100	0.02 ~ 0.03
Cr12	540	8	900 ~ 960	—

表 12-82 离子渗氮的典型应用

零件名称	工作条件	原用材料及 热处理工艺、 存在问题	离子渗氮应用情况				
			材料及预 先热处理	渗氮工艺	表面硬度	渗氮层厚度 /mm	应用效果
柴油机连杆 铰刀(φ14mm)		W18Cr4V 淬火回火	W18Cr4V 淬火回火	500 ~ 520℃ ≤ 30min	870 ~ 1090HV	0.01 ~ 0.03	寿命提高 5 倍

(续)

零件名称	工作条件	原用材料及热处理工艺、存在问题	离子渗氮应用情况				
			材料及预先热处理	渗氮工艺	表面硬度	渗氮层厚度/mm	应用效果
冷冻机阀片	承受冲击疲劳载荷, 720次/min	30CrMnSi 淬火回火 (46 ~ 54HRC), 寿命低于 5000h	30CrMnSi, 基体硬度 37 ~ 41HRC	380 ~ 420℃, 100 ~ 120min	61 ~ 65HRC	0.10 ~ 0.12	寿命提高 3 倍以上
大齿轮 ($\phi 455\text{mm} \times 25\text{mm}$)	精密传动	18CrMnTi 渗碳淬火发生翘曲变形报废; 改用 38CrMoAl 钢气体渗氮, 周期太长	20CrMnTi	550℃, 6h	830HV	0.4	变形符合要求, 生产周期缩短
高速锤精压叶片模	挤压叶片, 叶片材料 2Cr13	3Cr2W8V 淬火回火, 使用寿命低	3Cr2W8V 淬火回火, 硬度 48 ~ 52HRC	540℃, 12h	66 ~ 68HRC	0.4	脱模容易, 叶片光洁, 寿命提高数倍

表 12-83 其他渗氮方法

渗氮方法	原理	渗剂 (质量分数) (%)	工艺及效果
固体渗氮	把工件和粒状渗剂放入铁箱中加热保持	由活性剂和填充剂二部分组成。活性剂可用尿素、三聚氰酸 (HCNO) ₃ 、碳酸胍、 $[(\text{NH}_2)_2\text{CNH}]_2 \cdot \text{H}_2\text{CO}_3$ 、二聚氨基胍 $[\text{NHC}(\text{NH}_2)\text{NHCN}]$ 等。填充剂可用多孔陶瓷粒、蛭石氧化铝粒等	520 ~ 570℃ 保持 2 ~ 16h
盐浴渗氮	在含 N 熔盐中渗氮	1. 在 $\text{CaCl}_2 50 + \text{BaCl}_2 30 + \text{NaCl} 20$ 盐浴中通氮 2. 亚硝酸铵 (NH_4NO_2) 3. 亚硝酸铵 + 氯化铵	450 ~ 580℃
真空脉冲渗氮	先把炉罐抽到 1.33Pa 的真空度, 加热到渗氮温度, 通氮至 50 ~ 70kPa, 保持 2 ~ 10min, 继续抽到 5 ~ 10kPa 反复进行	氮	530 ~ 560℃
加压渗氮	通氮使渗氮工作压力提高到 300 ~ 5000kPa, 此时氮分解率降低, 气氛活度提高, 渗速快	氮	500 ~ 600℃ 渗速快, 渗层质量好
流态床渗氮	在流态床中通渗氮气氛, 也可采用脉冲流态床渗氮, 即在保温期使供氮量降到加热时的 10% ~ 20%	氮	500 ~ 600℃ 减少 70% ~ 80% 氮消耗, 节能 40%

(续)

渗氮方法	原 理	渗剂 (质量分数) (%)	工艺及效果
催化渗氮	1. 洁净渗氮法 往渗氮罐中加入 $0.15 \sim 0.6 \text{ kg/m}^3$ 与硅砂混合的 NH_4Cl 2. CCl_4 催化法 开始渗氮 $1 \sim 2 \text{ h}$ 往炉罐通 $50 \sim 100 \text{ mL CCl}_4$ 3. 稀土催渗法 将稀土化合物溶入有机溶剂通入炉罐	氮 + NH_4Cl	$500 \sim 600^\circ\text{C}$
电解气相催渗	干燥氮通过电解槽和冷凝器再入炉罐	1. 含 Ti 的酸性电解液 海绵钛: $5 \sim 10 \text{ g/L}$, 工业纯硫酸: $30\% \sim 50\%$, NaCl : $150 \sim 200 \text{ g/L}$, NaF : $30 \sim 50 \text{ g/L}$ 2. NaCl 、 NH_4Cl 各 100 g 饱和水溶液加入 $110 \sim 220 \text{ mL HCl}$ 和 $25 \sim 100 \text{ mL}$ 甘油, 最后加水至 1000 mL , $\text{pH} = 1$ 3. $\text{NaCl} 400 \text{ g}$, $25\% \text{ H}_2\text{SO}_4 200 \text{ mL}$, 加水至 1500 mL 也可再加甘油 200 mL	$500 \sim 600^\circ\text{C}$
高频感应加热渗氮	工件置于耐热陶瓷或石英玻璃容器中靠高频感应电流加热, 容器中通氮或工件表面涂膏剂	氮或含 N 化合物膏剂	$520 \sim 560^\circ\text{C}$
短时渗氮	保持适当的氮分解率, 适当提高渗氮温度在各种合金钢、碳钢和铸铁件表面获得 $6 \sim 15 \mu\text{m}$ 化合物层	氮	$560 \sim 580^\circ\text{C}$ $2 \sim 4 \text{ h}$ 氮分解率 $40\% \sim 50\%$ 表面层硬度高

表 12-84 渗氮常见缺陷的产生原因及防止措施

缺陷类型	产生原因	防止措施
渗氮层硬度低或硬度不均匀	渗氮温度偏高, 采用第一段氮分解率过高或渗氮罐与通氮管久未退氮, 启用新渗氮罐	经常校验仪表、热电偶, 防止电位差计失灵, 氮分解率取下限, 渗氮马弗罐与通氮管退氮, 新马弗罐应经过预渗, 使分解率平衡控制
	工件未洗净, 表面有油渍, 调质硬度低 材料组织不均匀 密封不良, 炉盖等处漏气 装炉不当, 气氛循环不良, 局部防渗锡层流淌	洗净油污 降低回火温度, 提高调质后硬度 调整预备热处理工艺 更换石墨石棉垫, 加强密封合理装炉, 保证气流畅通, 改用其他防渗涂料
渗氮层厚度浅	温度 (尤其是两段渗氮的第二段温度) 偏低 保温时间短 渗氮马弗罐久未退氮或换新	适当提高温度, 校正仪表及热电偶 酌情延长时间 清除内壁污垢, 退氮, 最好改用搪瓷马弗
	第二段氮分解率低 装炉不当, 零件未经调质处理, 零件靠得太近, 气氛循环不良	提高氮分解率 合理装炉, 保证零件间留有 5 mm 以上空隙, 通过调质处理使基体组织形成均匀致密的回火索氏体

(续)

缺陷类型	产生原因	防止措施
渗氮层脆性大	表面出现 ζ 相 (Fe_2N)	渗氮后将氮分解率提高到 70% 以上, 于 500 ~ 570℃ 保温 2 ~ 4h, 通过退氮使 $\xi \rightarrow \epsilon$ ($\text{Fe}_{2.3}\text{N}$)
渗氮件变形超差	机加工产生的应力较大, 零件细长或形状复杂 局部渗氮或渗氮面不对称 渗氮层较厚时因比体积大而产生较大组织应力, 导致变形 渗氮罐内温度场不均匀度大 零件自重的影响或装炉方式不当	粗磨后去应力处理, 精磨进给量减小, 采用缓慢、分阶段升温法减低热应力, 即 300℃ 以上每 100℃ 保温 1h。渗氮之后冷却速度也尽量降低一些 改进设计, 避免不对称; 局部渗氮时加热与冷却速度应降低 胀大部位采用负公差, 尺寸取下限; 反之则尺寸取上限, 选择合理的渗层厚度, 防止过厚 改进电热体布置, 深井炉分段控温, 强化循环 长杆件吊挂时必须与轴中心线平行 (垂直于端面) 必要时设计专用卡具吊具
表面氧化色	冷却时供氮不足, 罐内负压而吸入空气 渗氮罐与炉盖处密封不好 干燥剂失效, 氨中含水过多 出炉温度过高	适当增大氮流量, 保证罐内正压 改进密封措施 更换干燥剂 炉冷至 200℃ 以下出炉
表面腐蚀	氯化铵 (或四氯化碳) 加入量过多, 挥发太快	除不锈钢气体渗氮外, 其余钢件不应采用此种收效甚微的方法 采用时用量不可高, 并应与石英砂混和以防分解, 挥发太快
渗氮形成网状脉状或鱼骨状氮化物	渗氮温度太高, 原始组织晶粒粗大零件有尖角、锐边表面脱碳严重 加工粗糙度高 液氮含水量太高 气氛氮势过高	酌量降低并严格控制温度, 调质时淬火温度过高应降低, 改进设计, 尽量避免尖角、锐边, 调质处理的淬火工序应在充分脱氧的盐炉或保护气氛炉中进行, 或表面脱碳层在机加工时能完全切除 渗氮前的磨削加工后期进给量减小, 降低粗糙度 干燥剂应定时烘烤或更换 控制氮分解率, 勿使氮势过高
渗氮件表面有亮块、亮点, 硬度不均匀	罐内温差大 进氮管堵塞 零件表面有油污 装炉量太大	改进设备, 使有效加热区温差减小 清理、疏通 清理去污 合理装炉
化合物层不致密抗蚀性差	氮浓度低, 化合物层偏薄 冷却速度太慢, 氮化物分解造成疏松层偏厚 零件锈斑未除净	氮分解率不宜过高 冷速适当调整 入炉前应除净锈斑

表 12-85 几种钢在氨中渗氮的工艺参数

钢 号	渗 氮 工 艺				渗氮层厚度 /mm	表面层硬度 HV10	典型工件
	阶段	温度/℃	时间/h	氨分解率 (%)			
38CrMoAlA		510±10	35	20~40	0.30~0.35	1000~1100	镗杆活塞杆
		510±10	80	30~50	0.50~0.60	≥1000	
		535±10	35	30~50	0.45~0.55	950~1100	
	1	515±10	25	18~25	0.40~0.60	850~1000	十字销卡块大齿圈螺杆
	2	550±10	45	50~60			
	1	510±10	10~12	15~30	0.50~0.80	≥80HR30N	
	2	550±10	48~58	35~65			
	1	510±10	8~10	15~35	0.30~0.40	>700	齿轮
	2	550±10	12~14	35~65			
	3	550±10	3	>90			
	510±10	35~55	20~40	0.30~0.55	850~950	曲轴	
	500±10	50	15~30	0.45~0.50	550~650		
40CrNiMoA		520±10	25	25~35	0.35~0.55	≥68HR30N	曲轴
	1	520±10	20	25~35	0.40~0.70	≥83HR15N	
	2	545±10	10~15	35~50			
25CrNi4WA	1	520±10	10	25~35	0.25~0.40	≥73HRA	受冲击或重载零件
	2	550±10	10	45~65			
	3	520±10	12	50~70			
30Cr2Ni2WVA		500±10	35	15~30	0.25~0.30	650~750	同上
30Cr2Ni2WA 30CrMnSiA		500±10	55	15~30	0.45~0.50	650~750	同上
		500±10	25~30	20~30	0.20~0.30	≥58HRC	
30Cr3WA	1	500±10	40	15~25	0.40~0.60	60~70HRC	曲轴等
	2	520±10	40	25~40			
35CrNi3WA	1	505±10	40	15~35	≥0.7	>45HRC	
	2	525±10	50	40~60			
35CrMo		520±10	60~70	50~60	0.6~0.7	560~650	同上
	1	505±10	25	18~30	0.5~0.6	650~700	
	2	520±10	25	30~50			
50CrVA		460±10	15~20	10~20	0.15~0.25		弹簧
		480±10	7~9	15~35	0.15~0.25		
40Cr		490±10	24	15~35	0.20~0.30	≥550	齿轮
	1	520±10	10~15	25~35	0.50~0.70	≥50HRC	
	2	540±10	52	35~50			
18CrNiWA		490±10	30	25~30	0.20~0.30	≥600	轴
18Cr2Ni4A		500±10	35	15~30	0.25~0.30	650~750	

(续)

钢 号	渗 氮 工 艺				渗氮层厚度 /mm	表面层硬度 HV10	典型工件
	阶段	温度/℃	时间/h	氮分解率 (%)			
1Cr13		510 ± 10	55	20 ~ 40	0.15 ~ 0.25	950 ~ 1050	要求耐磨, 抗疲劳抗蚀 的零件
		550 ± 10	48	25 ~ 40	0.25 ~ 0.30	900 ~ 950	
2Cr13		500 ± 10	48	15 ~ 25	0.10 ~ 0.12	1000 ~ 1050	
		550 ± 10	50	40 ~ 45	0.25 ~ 0.35	850 ~ 950	
15Cr11MoV	1	530 ± 10	10	30 ~ 35	0.30 ~ 0.40	900 ~ 950	
15Cr12WMoV	2	580 ± 10	20	50 ~ 65			
4Cr14Ni14W2Mo		510 ± 10	35	18 ~ 23	0.04 ~ 0.06	80 ~ 85HR15N	
		560 ± 10	60	25 ~ 40	0.10 ~ 0.12	800 ~ 900	
		630 ± 10	40	50 ~ 80	0.08 ~ 0.14	≥80HR15N	
25Cr18Ni18W2		550 ± 10	55	40 ~ 55	0.15 ~ 0.22	850 ~ 1000	
		600 ± 10	24	35 ~ 50	0.12 ~ 0.16	850 ~ 950	
4Cr14Ni2W2		550 ± 10	55	40 ~ 55	0.18 ~ 0.25	900 ~ 1000	
		570 ± 10	55	45 ~ 60	0.20 ~ 0.30	800 ~ 900	
Cr10Si2Mo		590 ± 10	35 ~ 37	30 ~ 70	0.20 ~ 0.30	84HR15N	
1Cr18Ni9Ti		570 ± 10	80	35 ~ 55	0.20 ~ 0.30	900 ~ 1000	
1Cr18Ni9Ti	1	545 ± 10	30	25 ~ 40	0.20 ~ 0.30	≥900	
	2	565 ± 10	45	35 ~ 60			
3Cr2W8V		535 ± 10	12 ~ 16	25 ~ 40	0.15 ~ 0.20	1000 ~ 1100	模具
4Cr5W2VSi		560 ± 10	55	20 ~ 45	0.45 ~ 0.55	700 ~ 750	
Cr12, Cr12Mo Cr12MoV	1 2	480 ± 10 530 ± 10	18 22	14 ~ 27 30 ~ 60	≤0.20	700 ~ 800	
Cr18Si2Mo		570 ± 10	35	30 ~ 60	0.2 ~ 0.25	≥800	要求耐磨 的抗氧化零 件
W18Cr4V		515 ± 10	0.25 ~ 1	20 ~ 40	0.01 ~ 0.025	1100 ~ 1300	刀具

注: 凡未注明硬度类型的数据均为 HV10。

表 12-86 纯铁、碳素钢的抗蚀渗氮工艺

牌 号	渗 氮 工 艺				ε 相层厚度 /μm
	温度/℃	时间/h	氮分解率 (%)	冷 却 方 法	
DT (电工纯铁)	550 ± 10	6	30 ~ 50	随炉冷至 200℃ 以下空冷, 以提 高磁导率	20 ~ 40
DT	600 ± 10	3 ~ 4	30 ~ 60		20 ~ 40

(续)

牌 号	渗 氮 工 艺				ε 相层厚度 /μm
	温度/℃	时间/h	氮分解率 (%)	冷 却 方 法	
10 钢	600 ± 10	6	45 ~ 70	根据要求的性能, 零件的精度分 别冷至 200℃ 出炉。直接出炉空 冷、油冷或水冷	40 ~ 80
10 钢	600 ± 10	4	40 ~ 70		15 ~ 40
20 钢	610 ± 10	3	50 ~ 60		17 ~ 20
30 钢	620 ~ 650	3	40 ~ 70		20 ~ 60
40 钢、45 钢, 40Cr, 50 钢以及所有牌号的低碳钢	600 ± 10	2 ~ 3	35 ~ 55	要求基体具有强韧性的中碳或中 碳合金钢零件尽可能水冷或油冷	15 ~ 50
	650 ± 10	0.75 ~ 1.5	45 ~ 65		
	700 ± 10	0.25 ~ 0.5	55 ~ 75		

表 12-87 10 钢渗氮后的力学性能

试样处理规范	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ (%)	ψ (%)	a_K ① /J·cm ⁻²	薄片变形度② /mm
退火	437	310	33.2	80.0	160	8.28
500℃ × 1h 渗氮, 炉冷	—	—	—	—	—	8.03
650℃ × 1.5h 渗氮, 炉冷	480	351	27.5	68.2	142	4.26
650℃ × 1.5h, 油冷	501	389	23.8	64.9	127	2.15
750℃, 油淬	—	—	—	—	—	6.94
650℃ × 1.5h 渗氮, 炉冷 3h 后油冷	565	442	18.1	40.0	103	—
750℃ × 1h 渗氮, 油冷	—	—	—	—	—	1.00
750℃ × 3h 渗氮, 油冷	685	423	12.2	38.1	92	—
830℃ 渗氮 10min, 油冷	530	353	18.6	68.5	150	—
830℃ × 3h 渗氮, 油冷	628	380	9.0	30.7	83	—

① 冲击试样为夏氏缺口试样, 尺寸为 10mm × 10mm × 60mm。

② 薄片厚度为 0.5mm。

表 12-88 30 钢渗氮对腐蚀疲劳极限的影响

试验介质及试验结果 处理方法和效果	循环 10 ⁷ 次的腐蚀疲劳极限/MPa		
	自来水	w _{NaCl} 0.004% 水溶液	w _{NaCl} 3% 水溶液
未渗氮 (调质态)	255	170	102
620℃ 渗氮 2h	364	368	201
渗氮后 σ_{-1} 提高率 (%)	43.9	118.4	96

表 12-89 45 钢加氧渗氮时氧加入量对效果的影响①

加氧量 (%)	白亮层厚度/μm	扩散层厚度/mm	表面硬度 HV0.05
0	10	0.32	402 ~ 537
0.1	15	0.32	683
0.4	18 ~ 20	0.34	755
0.6	20 ~ 22	0.35	789 ~ 839
1.0	24 ~ 27	0.35	839 ~ 1010
2.0	27 ~ 30	0.35	683

① 在 25kW 井式炉中进行; 氮流量 0.37m³/h; 570℃ × 2h。

表 12-90 45 钢不同工艺渗氮效果

工艺名称	工艺规范	硬(氮)化层深度/mm		表面硬度 HV
		化合层/ μm	扩散层/mm	
离子渗氮	560℃ × 6 ~ 9h	0.35		530 ~ 700
加氧渗氮	570℃ × 3h	25 ~ 35	0.30 ~ 0.45	789 ~ 864
氨 + 酒精氮碳共渗	570℃ × 3h	10 ~ 12	0.20 ~ 0.40	562 ~ 685
电解气相氮碳共渗	570℃ × 2h	22 ~ 24	0.30 ~ 0.40	840 ~ 890
尿素氮碳共渗	570℃ × 3h	11	0.15 ~ 0.30	550 ~ 700
离子渗氮	570℃ × 5h, 氨分解气 + 1/100 丙酮气	0.06	0.39	504HV1 489HV5
高频淬火	850℃ 喷水冷却, 180℃ × 1h 油炉回火	2.5		59HRC
复合处理	离子渗氮 570℃ × 5h 炉冷后 800℃ 高频淬火水冷, 180℃ × 1h 回火	1.37		62.5HRC

表 12-91 20Cr 钢经不同渗氮处理后的效果

处理名称	工艺规范	表面硬度 HV	氮化层深度/mm	
			化合物层/ μm	扩散层/mm
气体渗氮	540℃ × 30h, 氨分解率 25% ~ 40%	618 ~ 631	0.35 ~ 0.40	
离子渗氮	510℃ × 15h	550 ~ 760	0.30	
离子渗氮	550℃ × 8h	618	0.30 ~ 0.40	
氧 - 氮渗氮	570℃ × 3h	752 ~ 839	10 ~ 15	0.20 ~ 0.30
酒精 + 氨氮碳共渗	570℃ × 3h	711 ~ 789	7 ~ 12	0.15 ~ 0.25

表 12-92 40Cr 钢不同渗氮工艺的结果

渗氮名称	工艺规范	表面硬度 HV	渗层深度/mm		脆性 /级
			化合层深/ μm	扩散层深/mm	
气体渗氮	510℃ × 55h, 分解率 18% ~ 30%	500 ~ 600	0.55 ~ 0.60		1
	I 段: 480℃ × 20h, 分解率 20% ~ 30% II 段: 500℃ × 15 ~ 20h, 分解率 30% ~ 60%	≥ 600	0.30 ~ 0.50		1
离子渗氮	480℃ × 8h	613 ~ 633	0.35 ^②		1
	500℃ × 8h	566 ~ 593	0.35 ~ 0.40 ^②		1
	520℃ × 8h	583 ~ 603	0.35 ~ 0.40 ^②		1
	560℃ × 8h	566	0.40 ~ 0.45 ^②		1
电解气相催渗渗氮	530℃ × 6h, 分解率 25% + 530℃ × 6h, 分解率 40%	560	0.50 ~ 0.55		—
高频渗氮	520 ~ 540℃ × 3h	582 ~ 621	0.18 ~ 0.20		—
酒精 + 氨氮碳共渗	570℃ × 3h	711 ~ 722 ^①	7 ~ 15	0.15 ~ 0.25	—
氧 - 氮渗氮	570℃ × 3h	789 ~ 940 ^①	16 ~ 24	0.20 ~ 0.30	—
甲酰胺 + 尿素氮碳共渗	570℃ × 3h	500 ~ 600	4 ~ 10	0.12	—

① 为显微硬度值。

② 此处离子渗氮层深度系从有关资料摘录, 仅供参考一编者。

表 12-93 25Cr2MoV 钢不同气体渗氮规范的结果

氮化规范	效 果	
	渗氮层深度/mm	表面硬度 HV
500℃ × 24h	0.32	836
560℃ × 24h	0.45	748
510℃ × 12h + 610℃ × 12h	0.60	635

化学成分(质量分数)(%): C0.22, Cr2.2, Mo0.5, V0.15; 渗氮前的硬度为 357HV。

表 12-94 38CrMoAl 钢不同渗氮工艺处理后的结果

工艺名称	工 艺 规 范	表面硬度 HV	渗层深度/mm	
			化合物层/ μm	扩散层/mm
气体渗氮	500 ~ 520℃ × 48 ~ 60h	1000 ~ 1100	0.4 ~ 0.5	
	540℃ × 40h	900 ~ 1000	0.5 ~ 0.6	
	(520℃ × 8h) + (560℃ × 12h) + (560℃ × 3h, 退氮)	850 ~ 1040	0.3 ~ 0.4	
离子渗氮	520℃ × 8h	1164	0.32	
	540℃ × 8h	988 ~ 1006	0.32	
	560℃ × 8h	968 ~ 988	0.35	
电解渗氮	560℃ × 4h, 氮分解率: 45%	891	0.26 ~ 0.28	
高频渗氮	520 ~ 540℃ × 3h	900 ~ 1070	0.28 ~ 0.31	
电解气相氮碳共渗	570℃ × 2h	1080 ~ 1150	14 ~ 18	0.23 ~ 0.25
氧-氮渗氮	570℃ × 3h	839 ~ 1060	15 ~ 16	0.20 ~ 0.3
氮+酒精氮碳共渗	570℃ × 3h	888 ~ 940	7 ~ 12	0.10 ~ 0.20
液体氮碳共渗	570℃ × 3h	960 ~ 1000	10	0.30

表 12-95 38CrMoAlA 钢 940℃ 淬火后的回火温度对渗氮层厚度的影响

回火温度/℃	硬度 HRC	渗氮层厚度/mm	渗氮工艺
590	34 ~ 36	0.37 ~ 0.38	520 ~ 530℃, 保温 35h, 氮分解率 25% ~ 45%
620	32 ~ 33	0.38 ~ 0.40	
650	29 ~ 31	0.40 ~ 0.43	
680	24 ~ 26	0.46 ~ 0.49	

表 12-96 Cr12MoV 钢不同渗氮处理的效果

渗氮名称	工 艺 规 范	表面硬度 HV	渗氮层深度/mm	
			化合物层/ μm	扩散层深/mm
气体渗氮	500℃ × 15h, 氮分解率 15% ~ 25% 520℃ × 30h, 氮分解率 35% ~ 50% 550℃ × 2h, 氮分解率 100%	> 750	0.15 ~ 0.25	
离子渗氮	550℃ × 20h	900 ~ 1200	0.10 ~ 0.20	
氧-氮氮碳共渗	570℃ × 3h, 油冷	880 ~ 940	6 ~ 8	0.10 ~ 0.15
氮+酒精氮碳共渗	570℃ × 3h, 油冷	752 ~ 839	5 ~ 7	0.05 ~ 0.10

表 12-97 3Cr2W8V 钢的渗氮处理工艺规范

工艺	温度/℃	时间/h	介 质	扩 散 层	
				渗层深度/mm	显微硬度 HV
氮碳共渗 渗氮	560	2	50% KCN + 50% NaCN	0.09	980 ~ 660
	560 ~ 580	8 ~ 10	氨, α 45% ~ 65%	0.18 ~ 0.25	1020 ~ 580

表 12-98 3Cr2W8V 钢不同渗氮工艺效果

渗氮名称	工 艺 规 范	渗氮层深度/mm		硬度 HV
		化合层/ μ m	扩散层/mm	
气体渗氮	I : 480℃ × 20h, 分解率 15% ~ 25% II : 520℃ × 20h, 分解率 30% ~ 50% III : 560℃ × 3h 退氮	0.20 ~ 0.35		≥ 600
离子渗氮	I : 500℃ × 4h; II : 560℃ × 6h	0.15 ~ 0.25		900 ~ 1115
电解催渗渗氮	I : 520℃ × 3h, 分解率 25% II : 540℃ × 4h, 分解率 35% ~ 40%	0.20		928
氧 + 氮氮碳共渗	570℃ × 3h	12 ~ 16	0.20 ~ 0.25	998 ~ 1610
氨 + 酒精氮碳共渗	570℃ × 3h	5 ~ 10	0.10 ~ 0.20	725 ~ 839

表 12-99 38CrNi2MoA 钢基体硬度对渗氮层硬化区厚度的影响

钢 号	基体硬度 HRC	由表面测至 82HR15N 处 的渗氮层深度/ μ m	钢 号	基体硬度 HRC	由表面测至 82HR15N 处 的渗氮层深度/ μ m
38CrNi2MoA	22 ~ 23	100 ~ 110	40CrMnMo	21 ~ 23	90 ~ 100
	25 ~ 26	170 ~ 180		26 ~ 28	160 ~ 170
	31 ~ 32	320 ~ 330		33 ~ 35	270 ~ 280
	36 ~ 37	> 500		36 ~ 37	330 ~ 340

表 12-100 5CrMnMo 钢的渗氮处理工艺规范

工 艺	温度/℃	时间/h	介 质	扩 散 层	
				渗层深度/mm	显微硬度 HV
氮碳共渗 渗氮 渗氮	560	2	KCN50% + NaCN50%	0.20 ~ 0.25	570 ~ 350
	480 ~ 500	25 ~ 50	氨分解率 25% ~ 40%	0.20 ~ 0.40	890 ~ 570
	560 ~ 580	10	氨分解率 35% ~ 40%	0.15 ~ 0.20	

表 12-101 5CrNiMo 钢的渗氮处理工艺规范

处理工艺	处理温度 /℃	处理时间 /h	介 质	扩 散 层	
				深度/mm	显微硬度 HV
氮碳共渗 渗氮 渗氮	560	2	KCN50% + NaCN50%	0.20 ~ 0.25	570 ~ 350
	480 ~ 500	25 ~ 50	氨分解率 25% ~ 40%	0.20 ~ 0.40	890 ~ 570
	560 ~ 580	10	氨分解率 35% ~ 40%	0.15 ~ 0.25	

表 12-102 4Cr5MoV1Si 钢的渗氮处理工艺规范

工 艺	温度/℃	时间/h	介 质	扩 散 层	
				深度/mm	显微硬度 HV
氮碳共渗	560	2	KCN50% + NCN50%	0.04	690 ~ 640
氮碳共渗	580	8	天然气 + 氨	0.25 ~ 0.30	860 ~ 635
渗氮	530 ~ 550	12 ~ 20	氨分解率 30% ~ 60%	0.15 ~ 0.20	760 ~ 550

表 12-103 4Cr5MoVSi 钢的渗氮处理工艺规范

工 艺	温度/℃	时间/h	介 质	扩 散 层	
				渗层厚度/mm	显微硬度 HV
氮碳共渗	560	2	KCN50% + NaCN50%	0.04	690 ~ 640
氮碳共渗	580	8	天然气 + 氨	0.25 ~ 0.30	860 ~ 830
渗氮	540	12 ~ 20	氨分解率 30% ~ 60%	0.15 ~ 0.20	760 ~ 550

表 12-104 4Cr5W2VSi 钢的渗氮处理工艺规范

工 艺	温度/℃	时间/h	介 质	扩 散 层	
				渗层深度/mm	显微硬度 HV
氮碳共渗	560	2	KCN50% + NaCN50%	0.04 ~ 0.07	710 ~ 580
氮碳共渗	580	8	天然气 + 氨	0.25	765 ~ 660
渗氮	530 ~ 550	12 ~ 20	氨分解率 30% ~ 60%	0.12 ~ 0.20	1115 ~ 650

表 12-105 5Cr2MoNiV 钢的渗氮处理工艺规范

处理方法	温度/℃	时间/h	介 质	扩 散 层	
				深度/mm	显微硬度 HV
氮碳共渗	560	2	KCN50% + NaCN50%	0.05	830 ~ 620
氮碳共渗	580	8	天然气 + 氨	0.25	825 ~ 600
渗氮	490 ~ 510	20 ~ 30	氨分解率 35% ~ 40%	0.30 ~ 0.40	1200 ~ 700

表 12-106 4Cr4Mo2WVSi 钢渗氮处理工艺规范

工 艺	温度/℃	时间/h	介 质	扩 散 层	
				层深/mm	显微硬度 HV
氮碳共渗	560	2	KCN50% + NaCN50%	0.03 ~ 0.04	830 ~ 680
氮碳共渗	580	8	天然气 + 氨	0.18 ~ 0.20	980 ~ 680
渗氮	550 ~ 560	12 ~ 15	氨, $\alpha = 45\% \sim 60\%$	0.20 ~ 0.25	860 ~ 740

表 12-107 4Cr2W2MoVSi 钢渗氮处理工艺规范

处理方法	温度/℃	时间/h	介 质	扩 散 层	
				深度/mm	显微硬度 HV
氮碳共渗	560	2	KCN50% + NaCN50%	0.09	615 ~ 535
氮碳共渗	580	8	天然气 + 氨	0.18 ~ 0.25	1350 ~ 680
渗氮	550 ~ 560	12 ~ 15	氨分解率 45% ~ 60%	0.12 ~ 0.25	900 ~ 680

表 12-108 5Cr3W3MoVSiNb 钢的渗氮处理工艺规范

处理方法	温度/℃	时间/h	介 质	扩散层深度/mm	显微硬度 HV
氮碳共渗	560	2	KCN50% + NaCN50%	0.07	940 ~ 860
渗氮	560 ~ 580	8 ~ 12	氨 (分解率 45% ~ 65%)	0.15 ~ 0.20	1060 ~ 660

表 12-109 520 ~ 540℃ 渗氮对 5 种钢疲劳极限的影响 (渗层厚度 0.35 ~ 0.45mm)

钢 号	试样规格与类型	σ_{-1} /MPa	
		调质状态	调质, 渗氮
45 钢	$\phi 7.5\text{mm}$ 的光滑试样	440	610
	$\phi 7.5\text{mm}$ 带有 0.5mm 缺口试样	250	480
38CrMoAlA	$\phi 7.5\text{mm}$ 的光滑试样	485	680
	$\phi 7.5\text{mm}$ 带有 0.3mm 缺口的试样	370	620
18Cr2Ni4WA	$\phi 7.5\text{mm}$ 的光滑试样	540	694
	$\phi 7.5\text{mm}$ 带有缺口的试样	227	517
	$\phi 30\text{mm}$ 的光滑试样	400	453
	$\phi 30\text{mm}$ 的缺口试样	178	272
	$\phi 40\text{mm}$ 的光滑试样	330	400
	$\phi 40\text{mm}$ 的缺口试样	163	233
38CrNiMoVA	$\phi 7.5\text{mm}$ 的光滑试样	511	694
	$\phi 7.5\text{mm}$ 的缺口试样	143	540
40CrMnMo	$\phi 7.5\text{mm}$ 的光滑试样	511	660
	$\phi 40\text{mm}$ 的长筒形光滑试样	490	520
	$\phi 40\text{mm}$ 带有 5mm 横向小孔试样	140	290
	镶嵌了胀圈的 $\phi 40\text{mm}$ 试样	180	440

表 12-110 铁素体、马氏体和奥氏体钢的渗氮、规范对渗层厚度和维氏硬度的影响

钢 号	处 理 规 范		渗层厚度 /mm	显微硬度 HV
	温度/℃	时间/h		
1Cr13	500	48	0.14 ~ 0.16	1000 ~ 1050
	550	48	0.25 ~ 0.30	900 ~ 950
	600	48	0.35 ~ 0.40	800 ~ 850
2Cr13	500	48	0.10 ~ 0.12	1000 ~ 1050
	550	48	0.25 ~ 0.30	900 ~ 950
	600	48	0.30 ~ 0.40	780 ~ 830
15Cr11MoV	530 (I 段)	10	0.35 ~ 0.4	900 ~ 950
15Cr12WMoV	580 (II 段)	20	0.35 ~ 0.4	900 ~ 950
45Cr14Ni14W2Mo	560	60	0.10 ~ 0.12	800 ~ 900
25Cr18Ni8W2	600	48	0.10 ~ 0.12	750 ~ 800
	560	24	0.12 ~ 0.14	950 ~ 1100
	560	40	0.16 ~ 0.20	900 ~ 950
	600	24	0.12 ~ 0.16	900 ~ 950
1Cr18Ni9, 1Cr18Ni9Ti	560	50 ~ 60	0.2 ~ 0.25	1000 ~ 1100

表 12-111 为消除渗氮工件白亮层必要磨削量的一般参考资料

最大磨削量			最大磨削量		
渗氮时间/h	一段渗氮/mm	两段渗氮/mm	渗氮时间/h	一段渗氮/mm	两段渗氮/mm
12	0.01	0.01	48	0.05	0.03
24	0.03	0.03	60	0.06	0.04
36	0.04	0.03	72	0.08	0.05

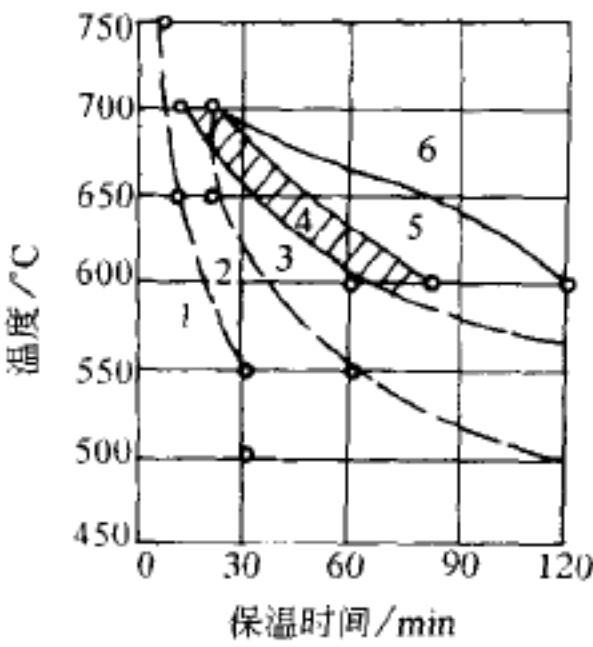


图 12-74 推荐的抗蚀渗氮工艺（影线区）
1—不耐蚀区 2—在水中不腐蚀的多孔性渗层
3—氮浓度不完全饱和的多孔渗层 4—推荐的抗蚀渗氮区 5—弹性合格区 6—脆性区

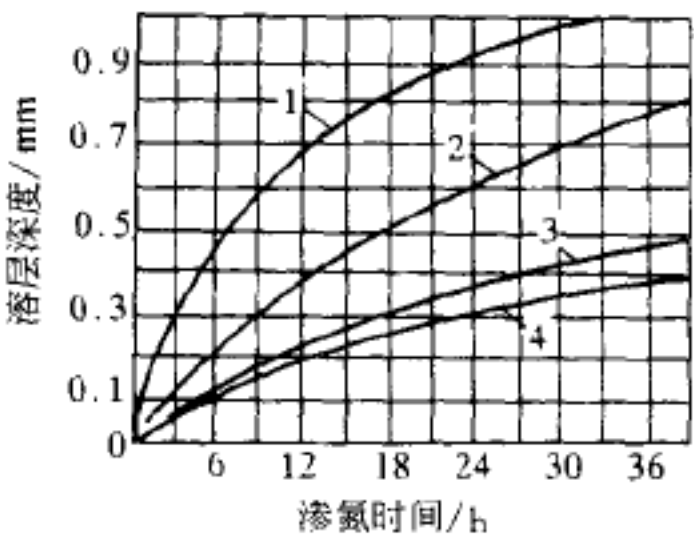


图 12-65 550°C 渗氮时钢中碳含量对氮渗层深度的影响
1— $w_c 0.06\%$ 2— $w_c 0.54\%$
3— $w_c 0.82\%$ 4— $w_c 1.14\%$

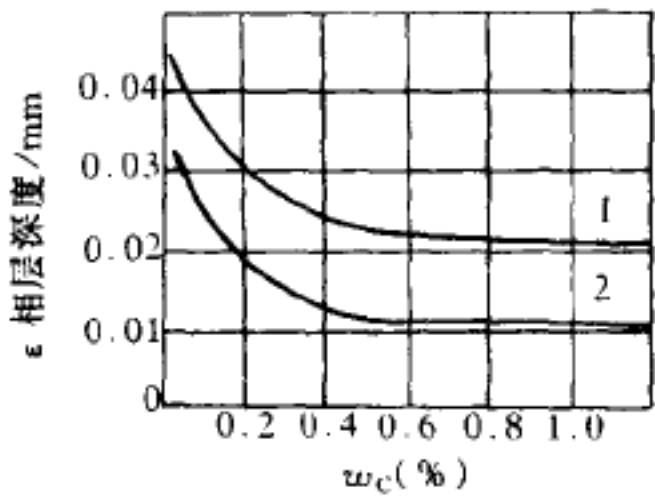


图 12-76 渗氮时钢中碳含量对ε相深度的影响（渗氮6h）
渗氮温度：1—600°C 2—550°C

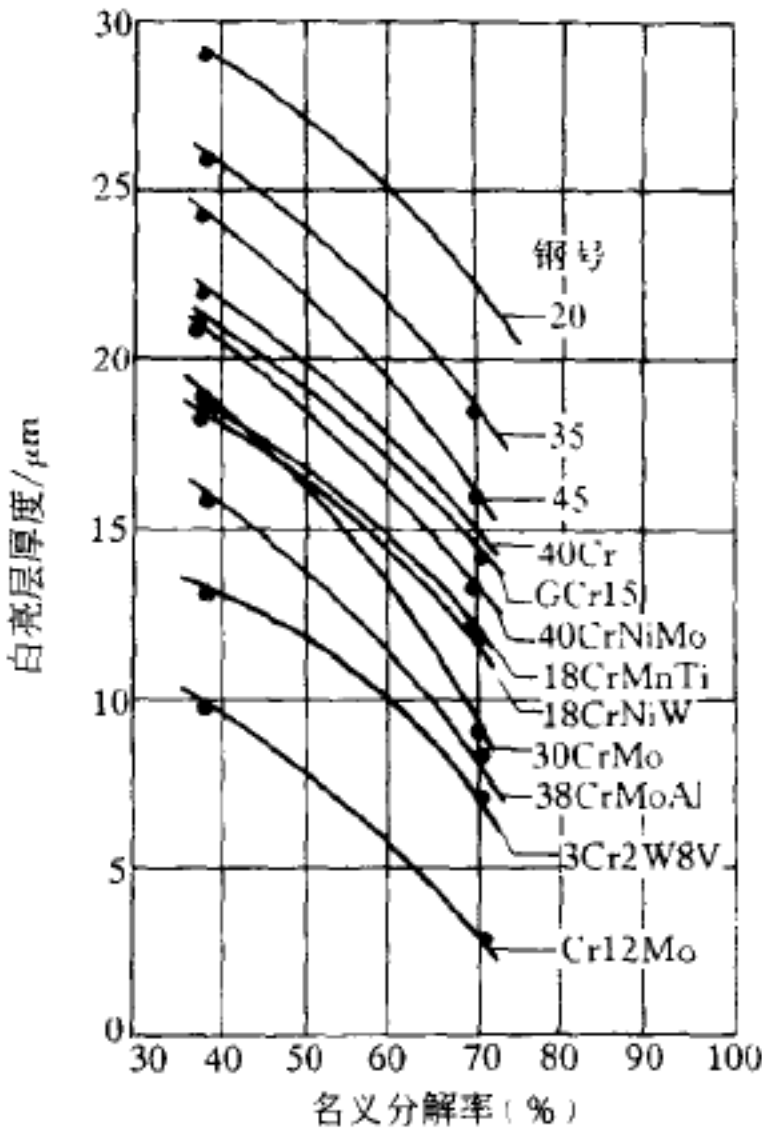


图 12-77 氮分解率与白亮层厚度的关系（氮+酒精氮碳共渗570°C x 3h）

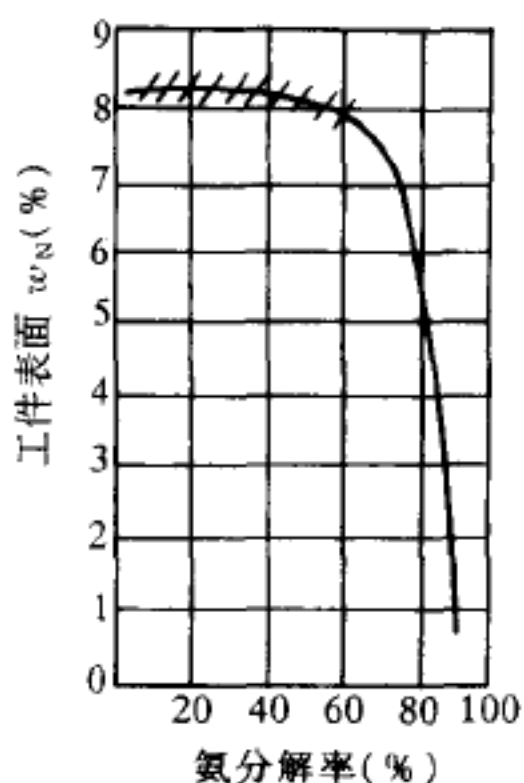


图 12-78 氨分解率对钢
表面氮含量的影响
(520℃, 24h)

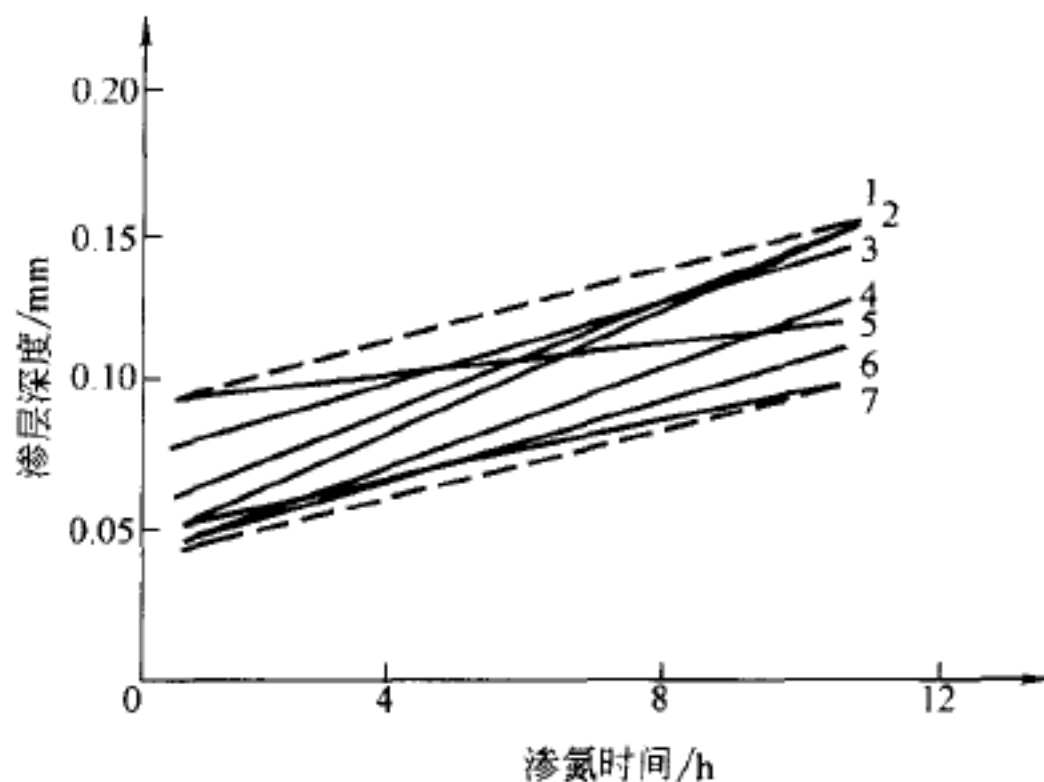


图 12-79 渗氮层深度与渗氮时间的关系
1—9SiCr 2—5Cr4W5Mo2V 3—W6Mo5Cr4V2 4—Cr12MoV
5—GCr15 6—7Cr7Mo2V2Si 7—Cr12

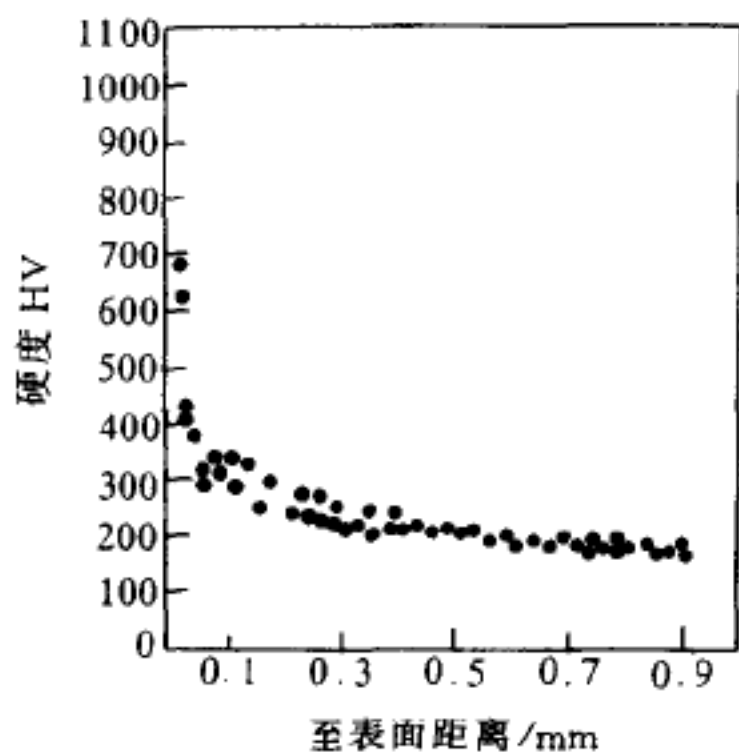


图 12-80 10 钢离子渗氮后的硬度分布
(600℃ × 10h)

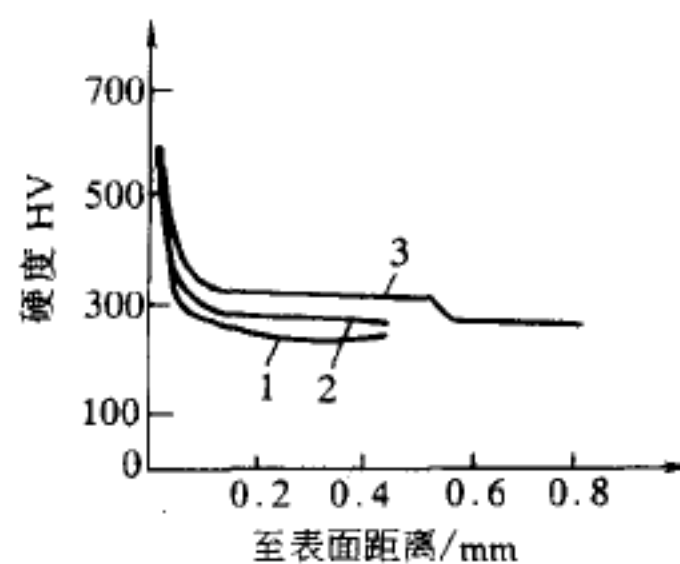


图 12-81 45 钢离子渗氮后的硬度分布
1—520℃ × 30min 2—520℃ × 4h 3—520℃ × 6.5h

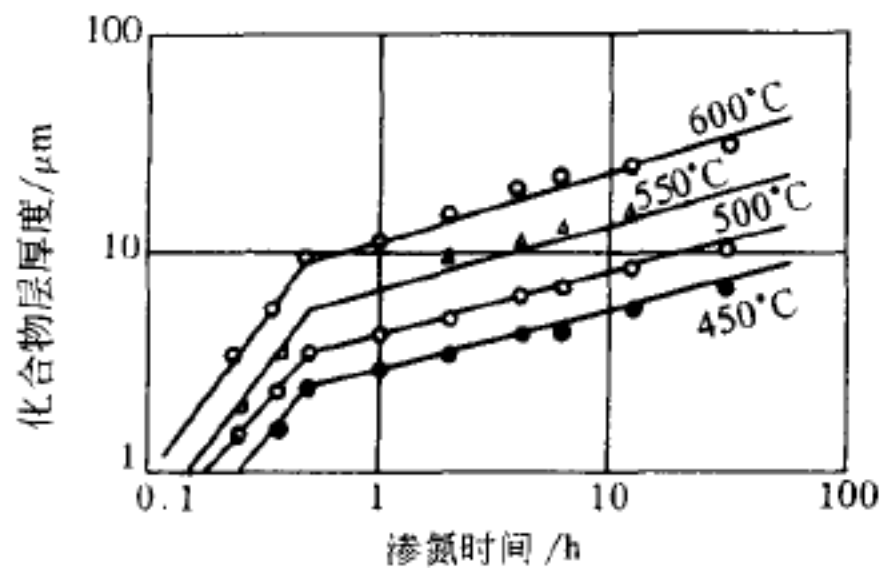


图 12-82 S48C 钢离子渗氮温度和时间
对化合物层厚度的影响
 $N_2:H_2 = 2:1$ ($C_2H_6:1$ 体积%)
真空度 40Pa

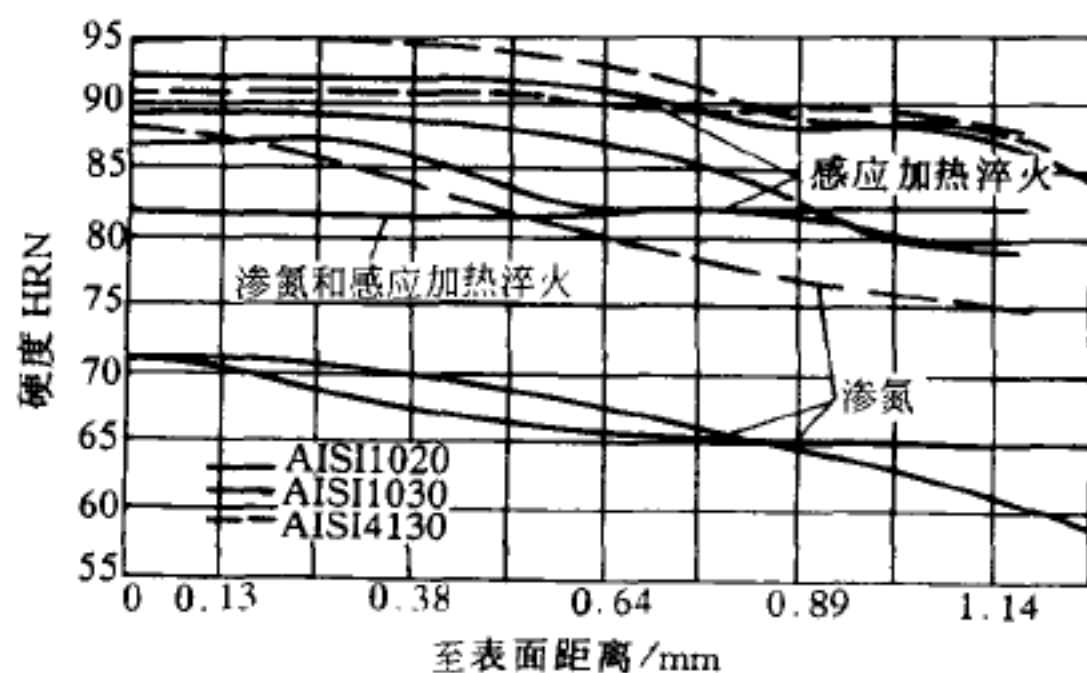


图 12-83 20、30、30CrMo 钢感应淬火后进行
渗氮处理与单一处理的表面硬度比较
AISI1020—20 AISI1030—30
AISI4130—30CrMo

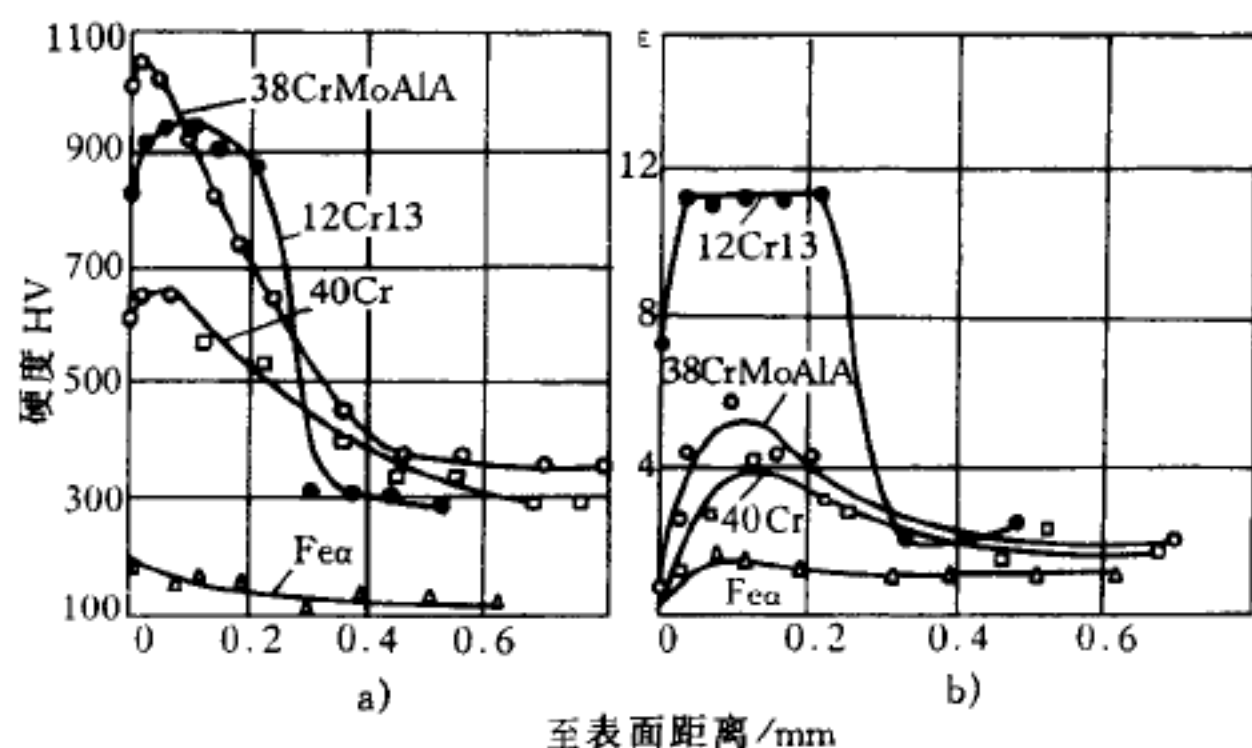


图 12-84 40Cr 钢等, 气体渗氮后的硬度分布
a) 和相应的耐磨性 ϵ 的变化
b) (渗氮工艺: $540^{\circ}\text{C} \times 33\text{h}$)

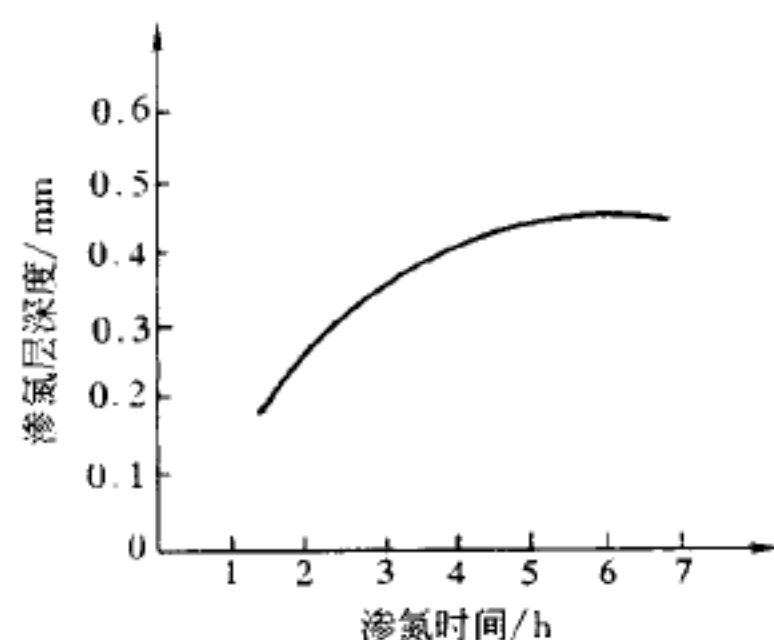


图 12-86 40Cr 钢离子渗氮时间与层深的关系
设备: HD-35 温度 540°C 炉压 $400 \sim 666.6\text{Pa}$
电压 $500 \sim 600\text{V}$ 电流密度 $3 \sim 5\text{mA}/\text{cm}^2$

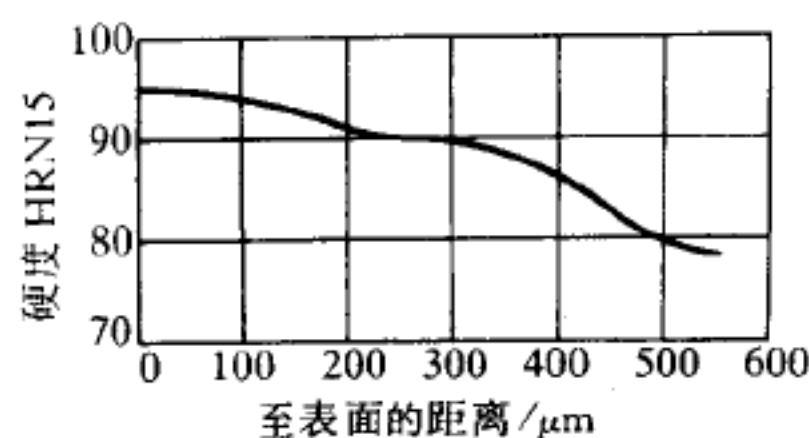


图 12-88 40CrMo 钢两段渗氮 (525°C , 8h, 565°C , 42h) 后的硬度梯度

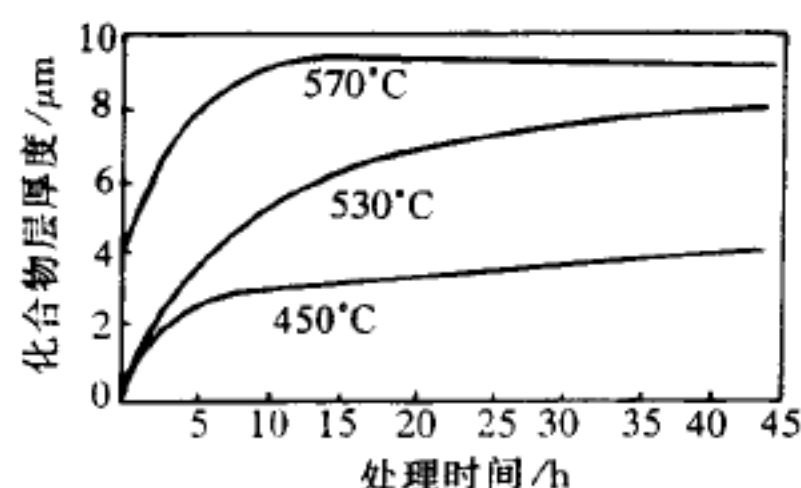


图 12-90 42CrMo 钢离子渗氮时间
对化合物层厚度的影响

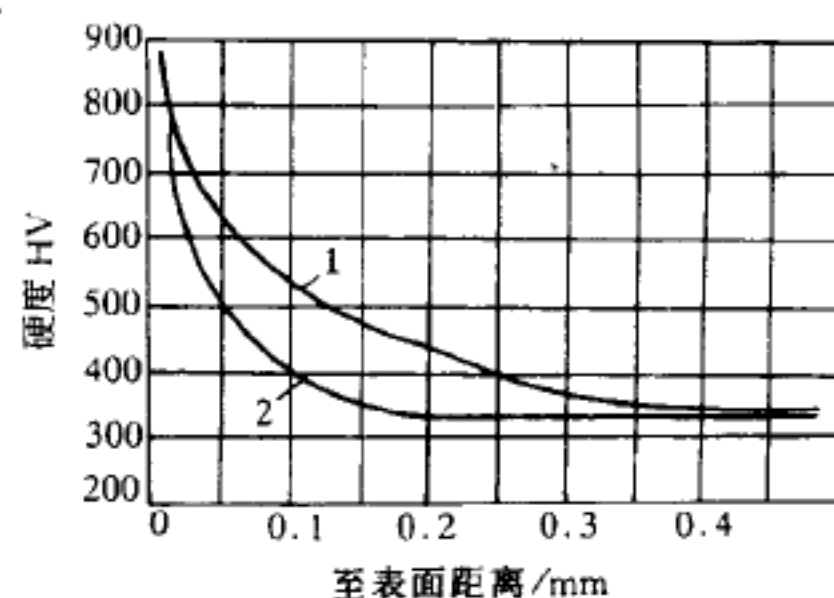


图 12-85 40Cr 钢离子渗氮后的
硬度分布 (560°C 渗氮)
1—调质 + 渗氮 8h 2—正火 + 渗氮 6h

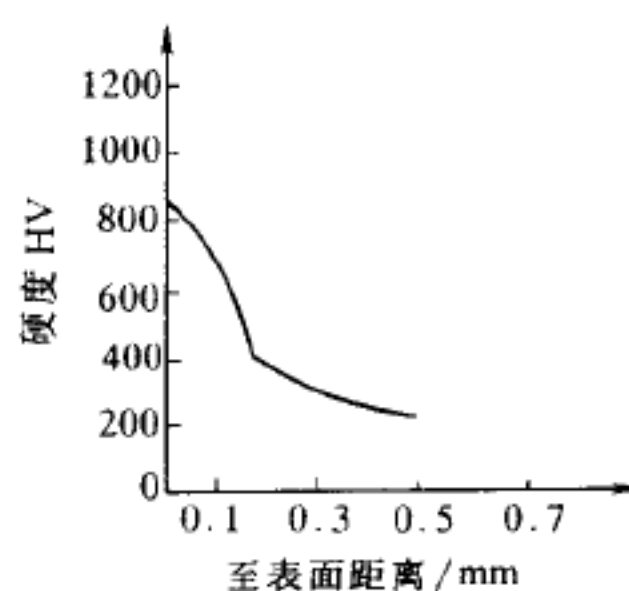


图 12-87 35CrMo 钢离子渗氮后的
硬度分布 ($570^{\circ}\text{C} \times 3\text{h}$)

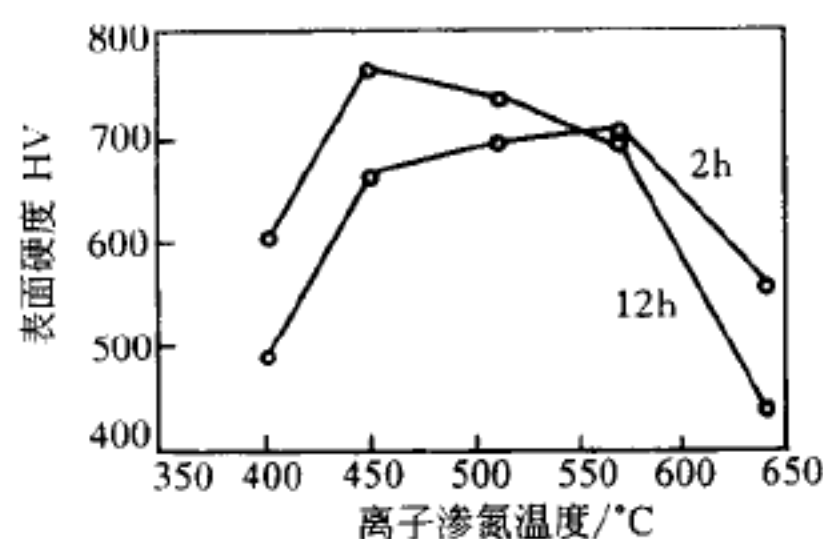


图 12-89 42CrMo 钢离子渗氮温度
对表面硬度的影响

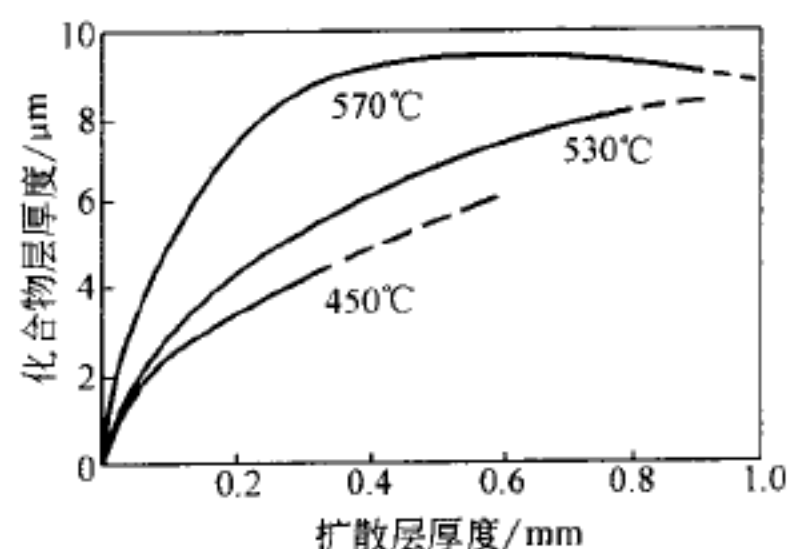


图 12-91 42CrMo 钢离子渗氮后的 γ' -相
化合物层厚度与扩散层厚度的对应关系

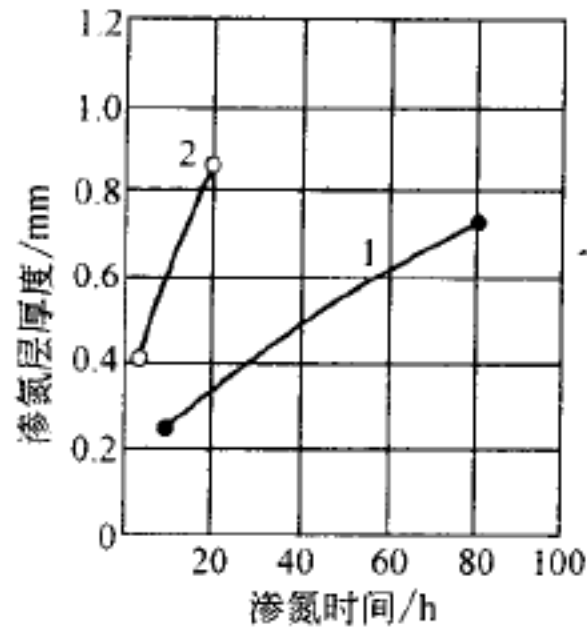


图 12-92 42CrMo 钢渗氮时间与层深的关系
1—530℃、550℃二段气体渗氮
2—氮碳共渗 (Uninitc 法) —570℃ × 4h

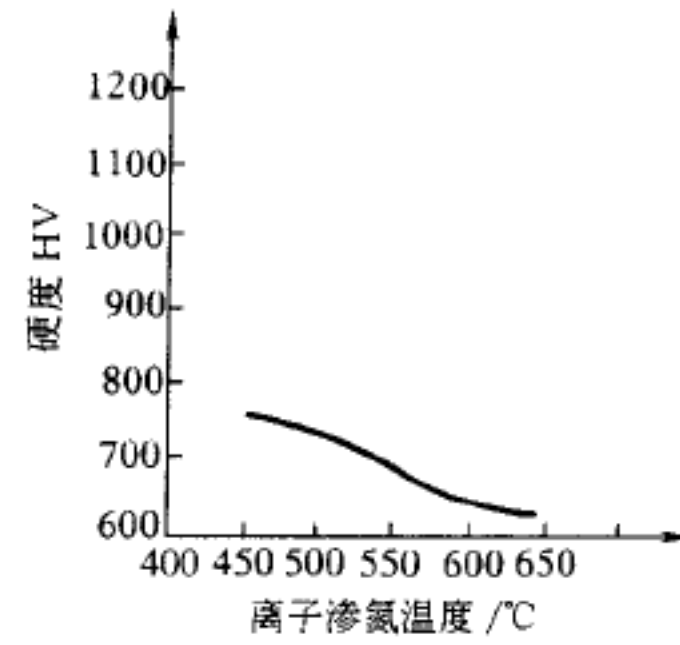


图 12-93 25Cr2MoV 钢离子渗氮
温度对硬度的影响

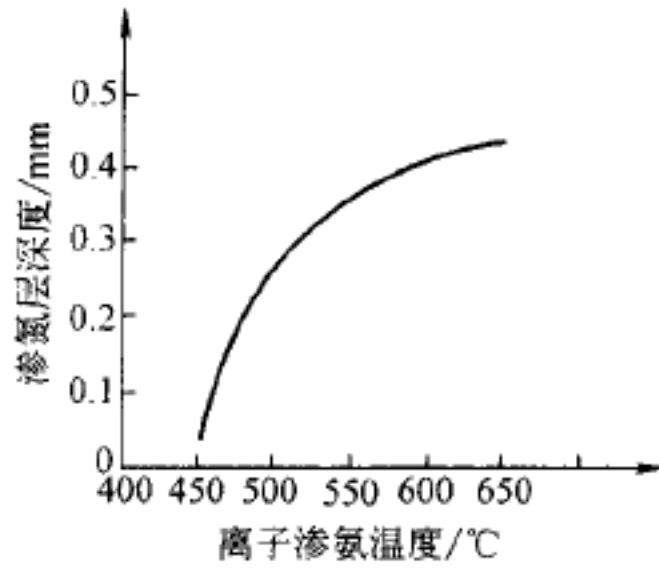


图 12-94 25Cr2MoV 钢离子渗氮温度
对氮层深度的影响 (渗氮 5h)

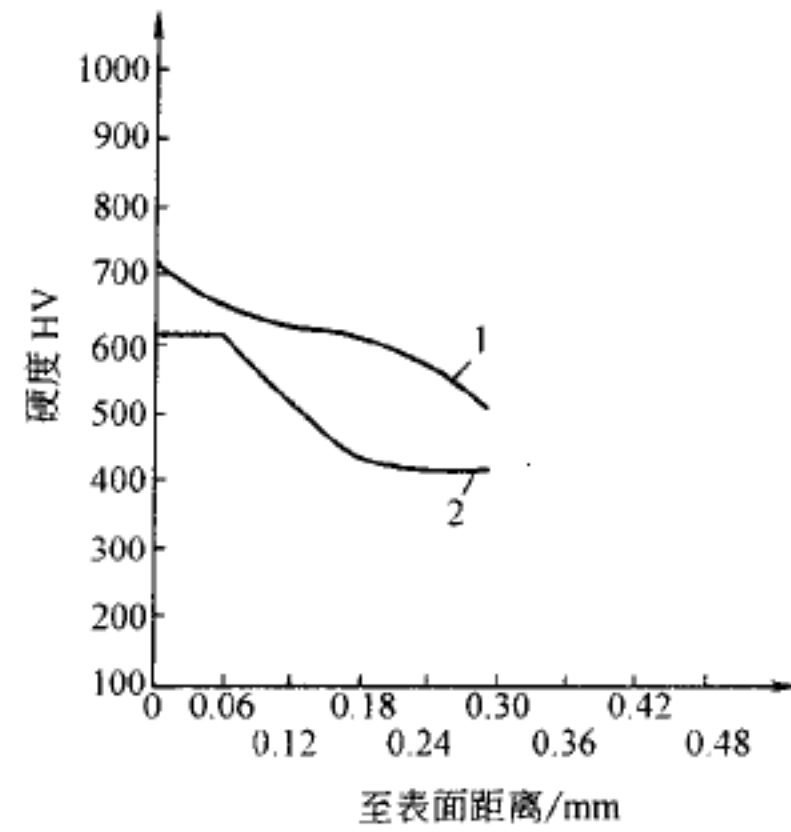


图 12-95 25Cr2MoV 钢离子渗氮后的硬度分布
1—550℃ 渗氮层深 0.32mm
2—600℃ 渗氮层深 0.36mm

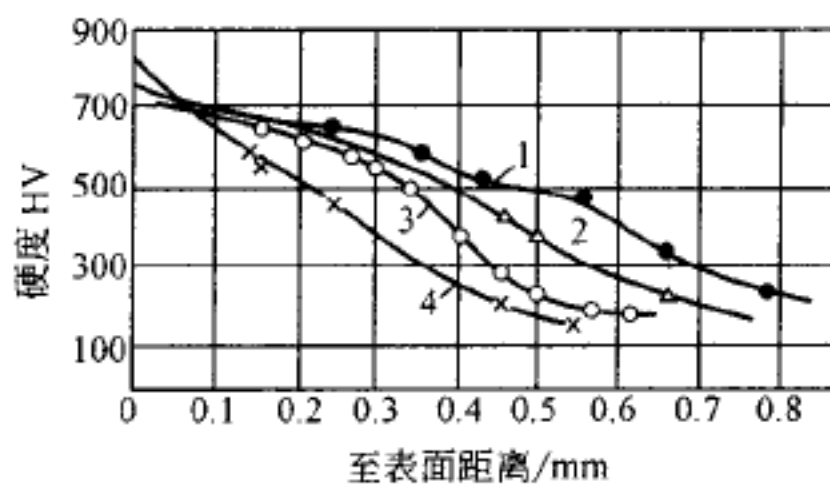


图 12-96 18CrMnTi 钢离子渗氮
不同时间后的硬度分布
1—36h 2—24h 3—12h 4—6h

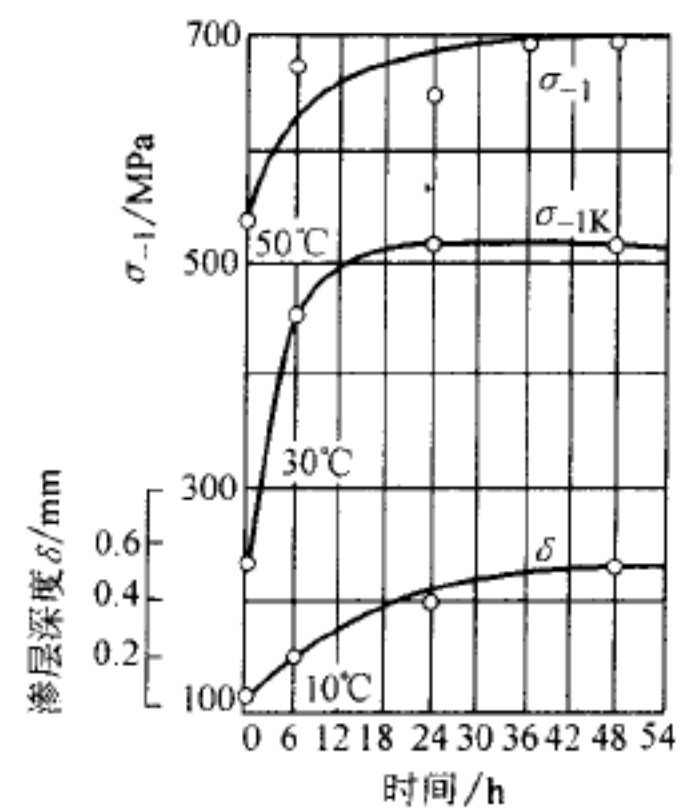


图 12-97 18Cr2Ni4W 钢 520℃ 渗氮时间
对层深和疲劳强度的影响
 σ_{-1K} —缺口试样的疲劳强度 δ —层深

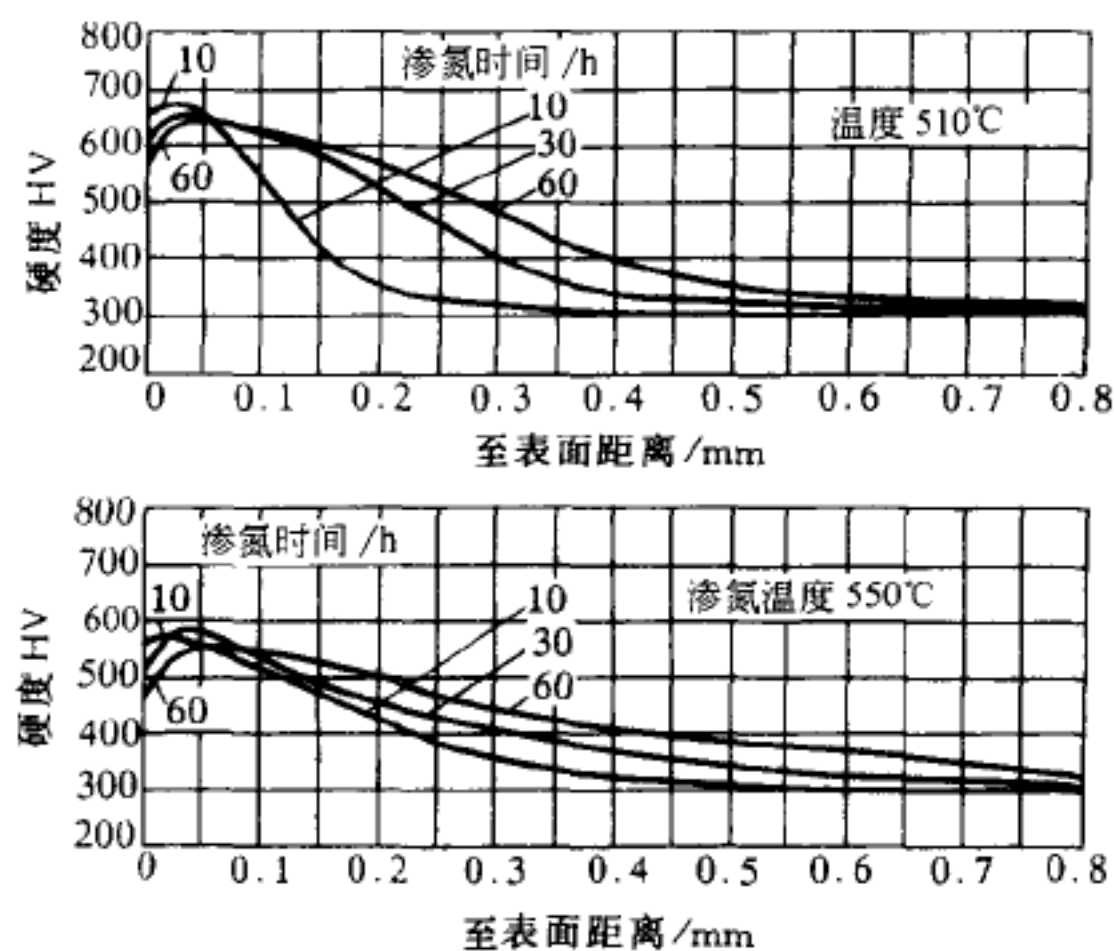


图 12-98 40CrNiMo (BS817M40) 钢于 510°C 和 550°C 渗氮 10、30、60h 后的硬度分布

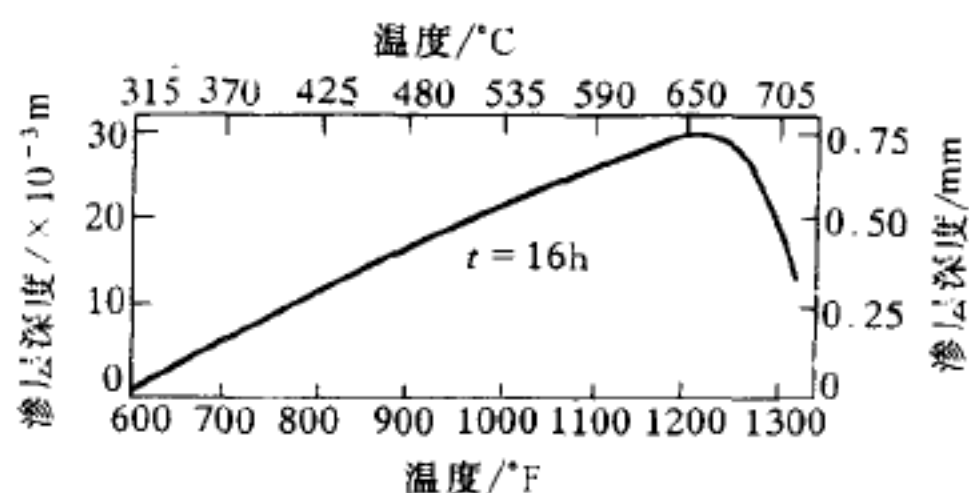


图 12-99 40CrNiMo (AISI4340) 钢离子渗氮温度与层深的关系

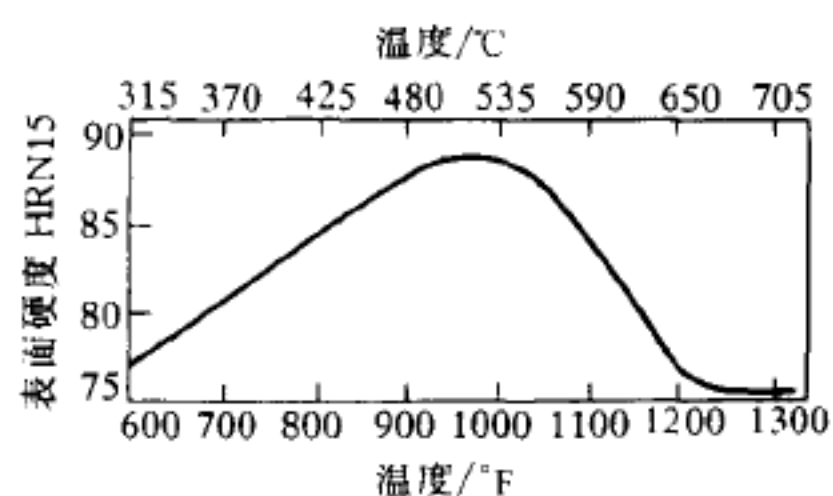


图 12-100 40CrNiMo (AISI4340) 钢离子渗氮温度与硬度的关系

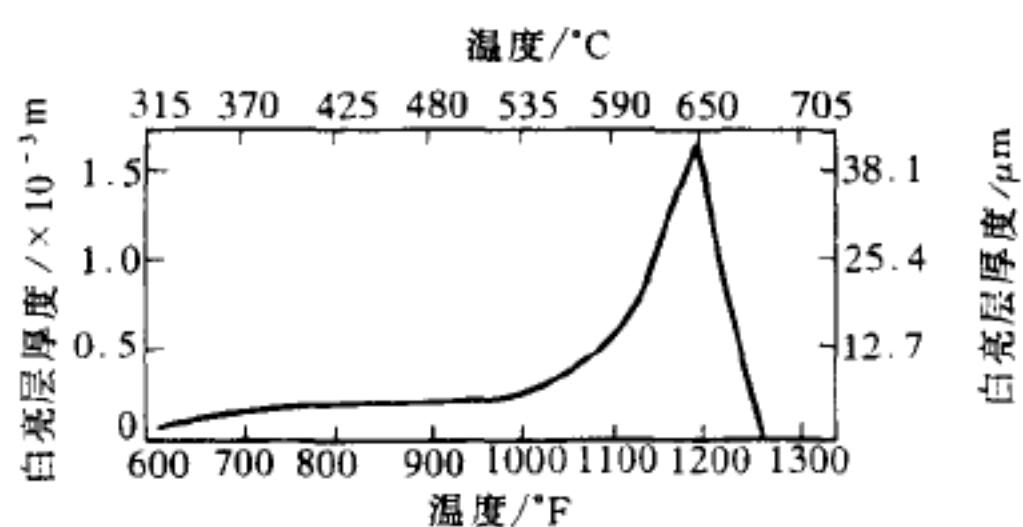


图 12-101 40CrNiMo (AISI4340) 钢离子渗氮温度与白亮层厚度的关系

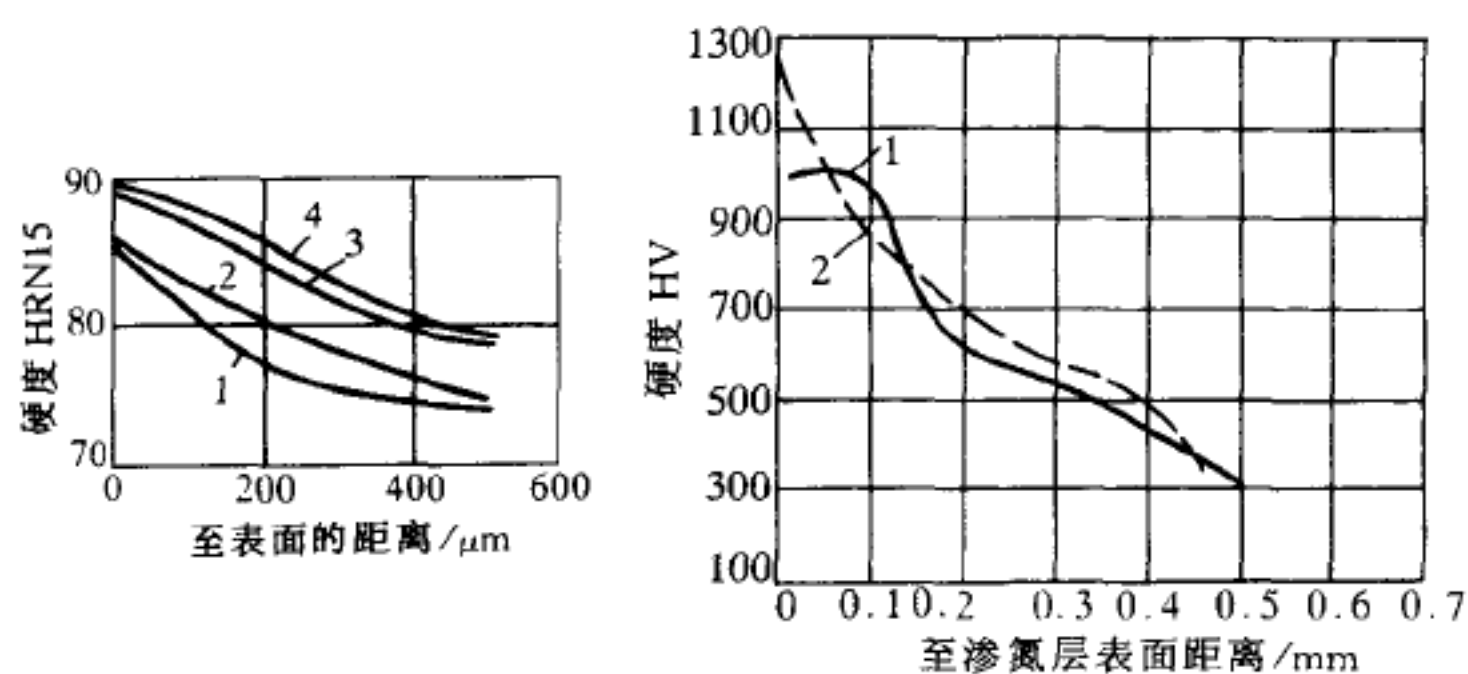


图 12-102 40CrMnMo 钢一段渗氮 (520°C, 25h, 氮分解率 20% ~ 30%) 后的硬度梯度
基体硬度: 1—21 ~ 23HRC
2—26 ~ 28HRC 3—33 ~ 35HRC
4—36 ~ 37HRC

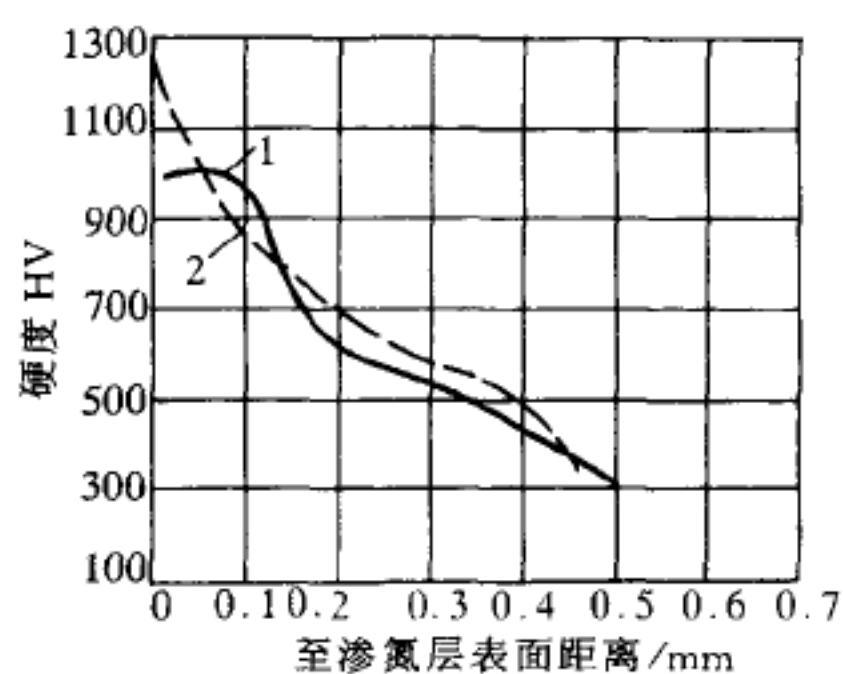


图 12-103 38CrMoAl 钢渗氮层硬度分布曲线
1—两段渗氮法: 510°C 20h, 氮分解率 25% ~ 35%, 550°C 15h, 氮分解率 40% ~ 60%; 退氮 1h 2—510°C 15h, 氮分解率 18% ~ 25%, 560°C 25h, 氮分解率 55% ~ 65%

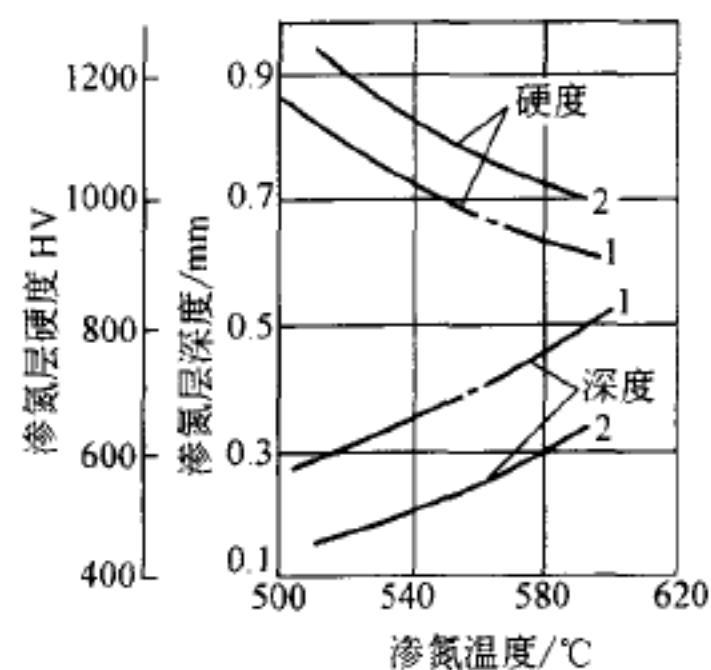


图 12-104 38CrMoAl 钢渗氮层深度和表面硬度与渗氮温度的关系
渗氮 6h 1—离子渗氮
2—气体渗氮

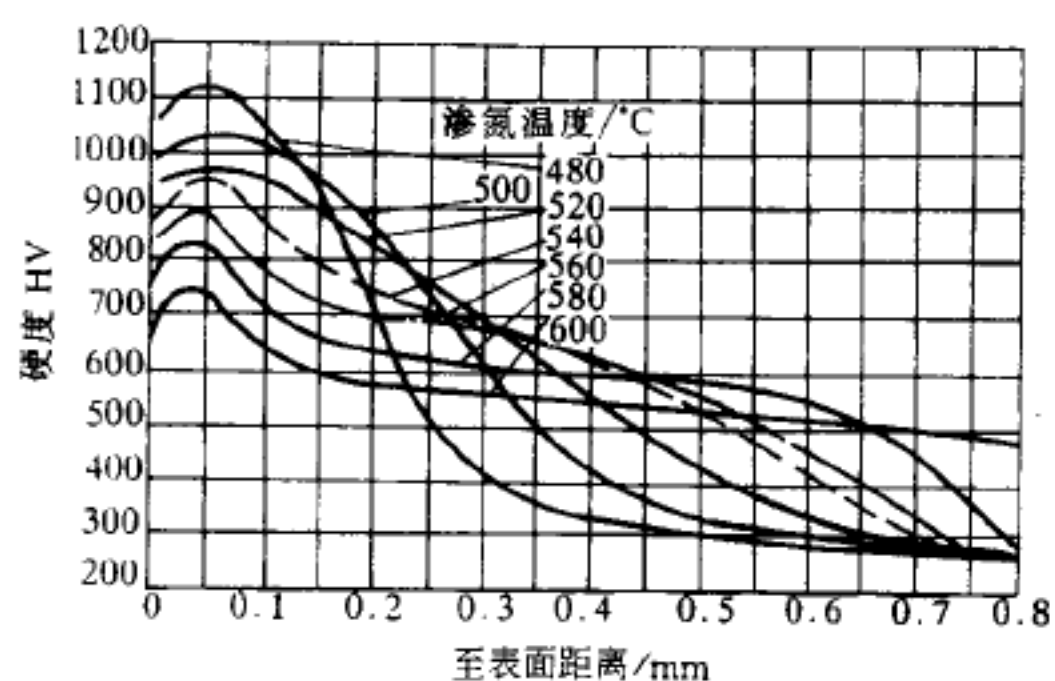


图 12-105 38CrMoAl (En41B) 钢渗氮
温度对硬度的影响 (渗氮 160h)

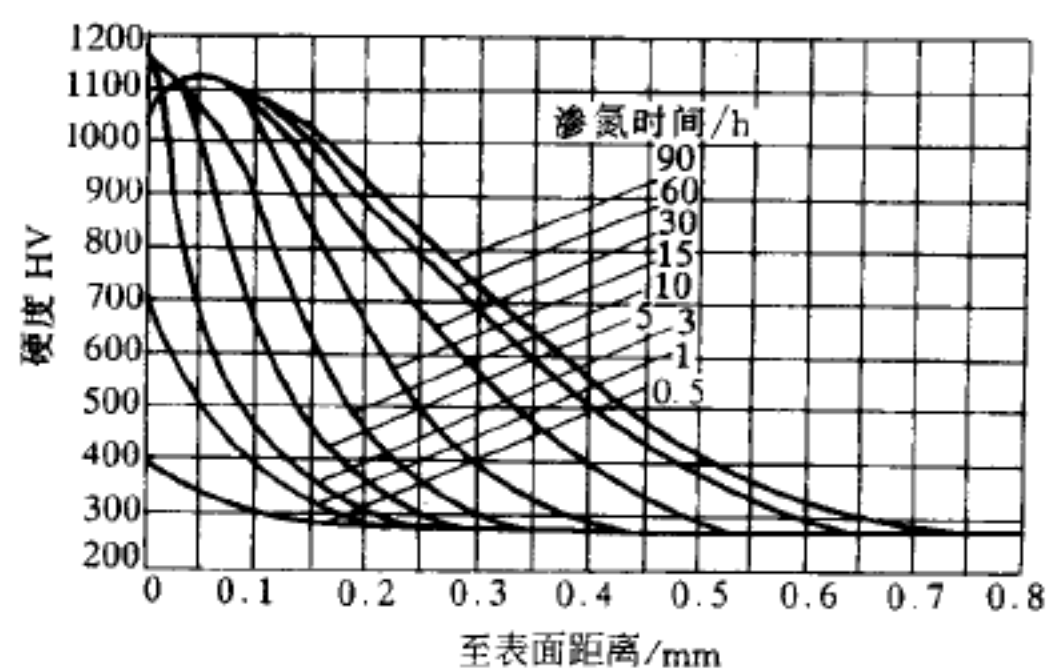


图 12-106 38CrMoAl 钢气体渗氮层的
硬度分布 (渗氮温度 510°C)

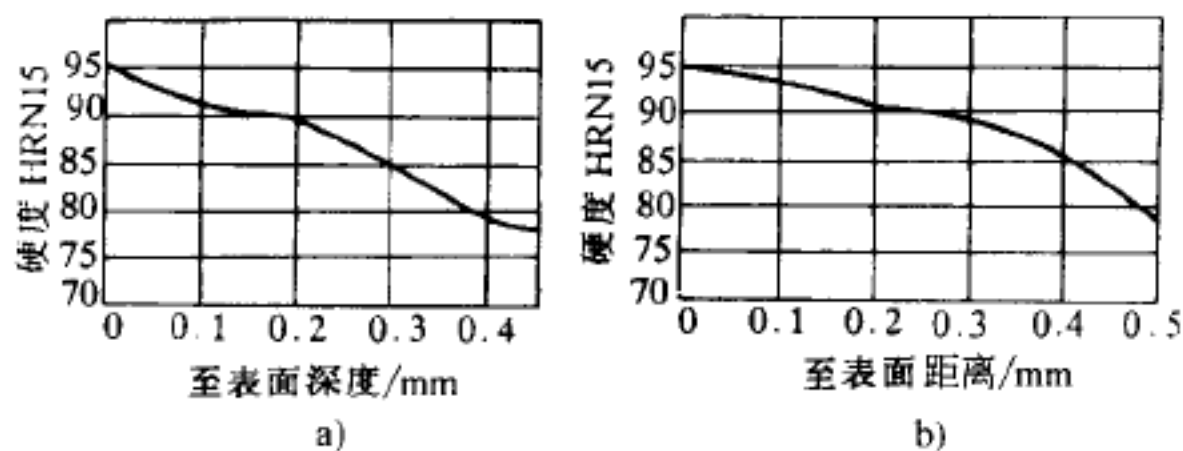


图 12-107 38CrMoAl 钢二段渗氮后的硬度分布

- a) 第一段: 525°C × 6h, 氨分解率 20%;
第二段: 565°C × 29h, 氨分解率 70%
b) 第一段: 525°C × 8h, 氨分解率 20%;
第二段: 565°C × 42h, 氨分解率 70%

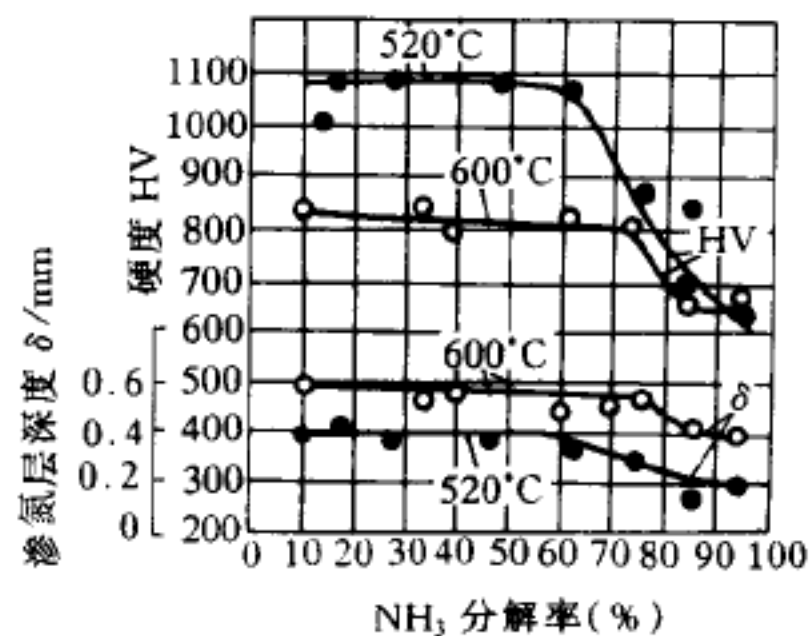


图 12-108 氨分解率对 38CrMoAl 钢
渗氮层深度和硬度的影响

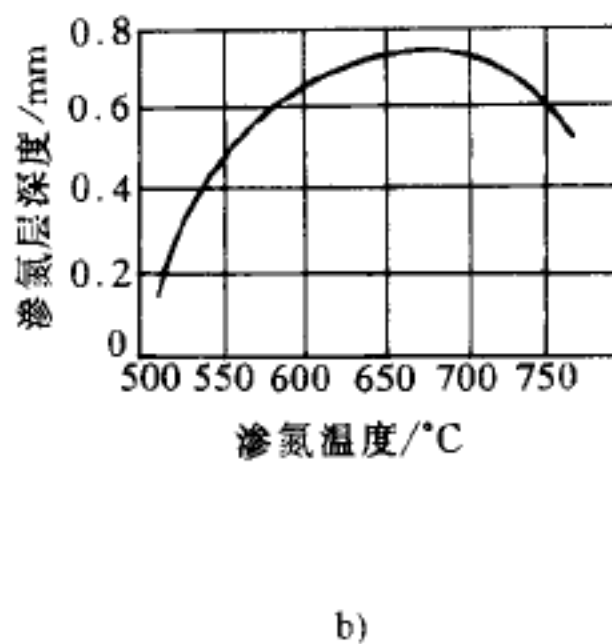
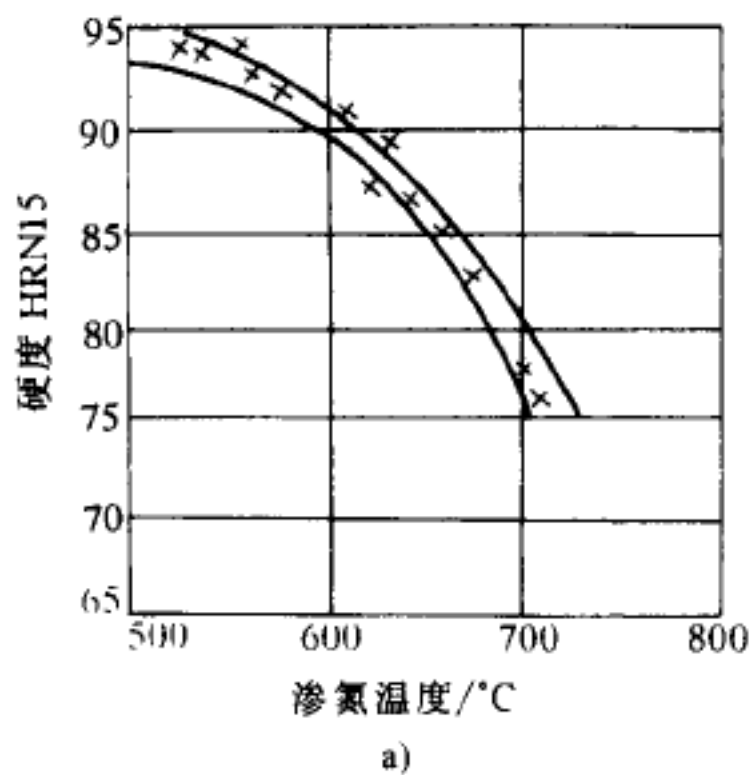


图 12-109 离子渗氮温度对 38CrMoAl 钢渗氮层表面硬度 a) 和深度 b) 的影响

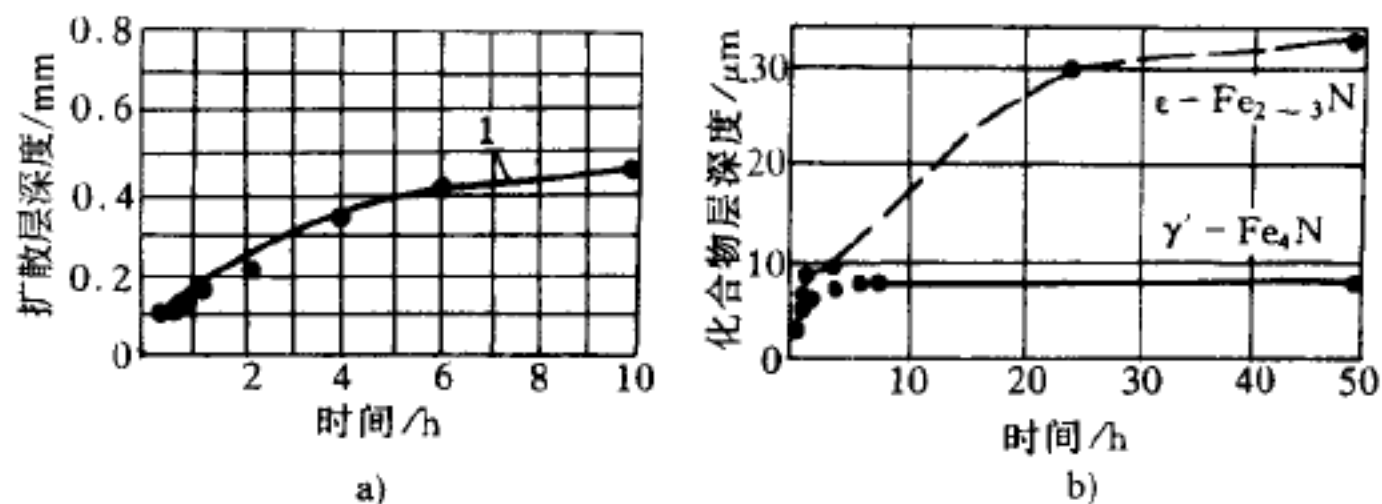


图 12-110 38CrMoAl 钢离子渗氮时间对扩散层深度 a) 及化合物层深度 b) 的影响 渗氮温度: 550°C

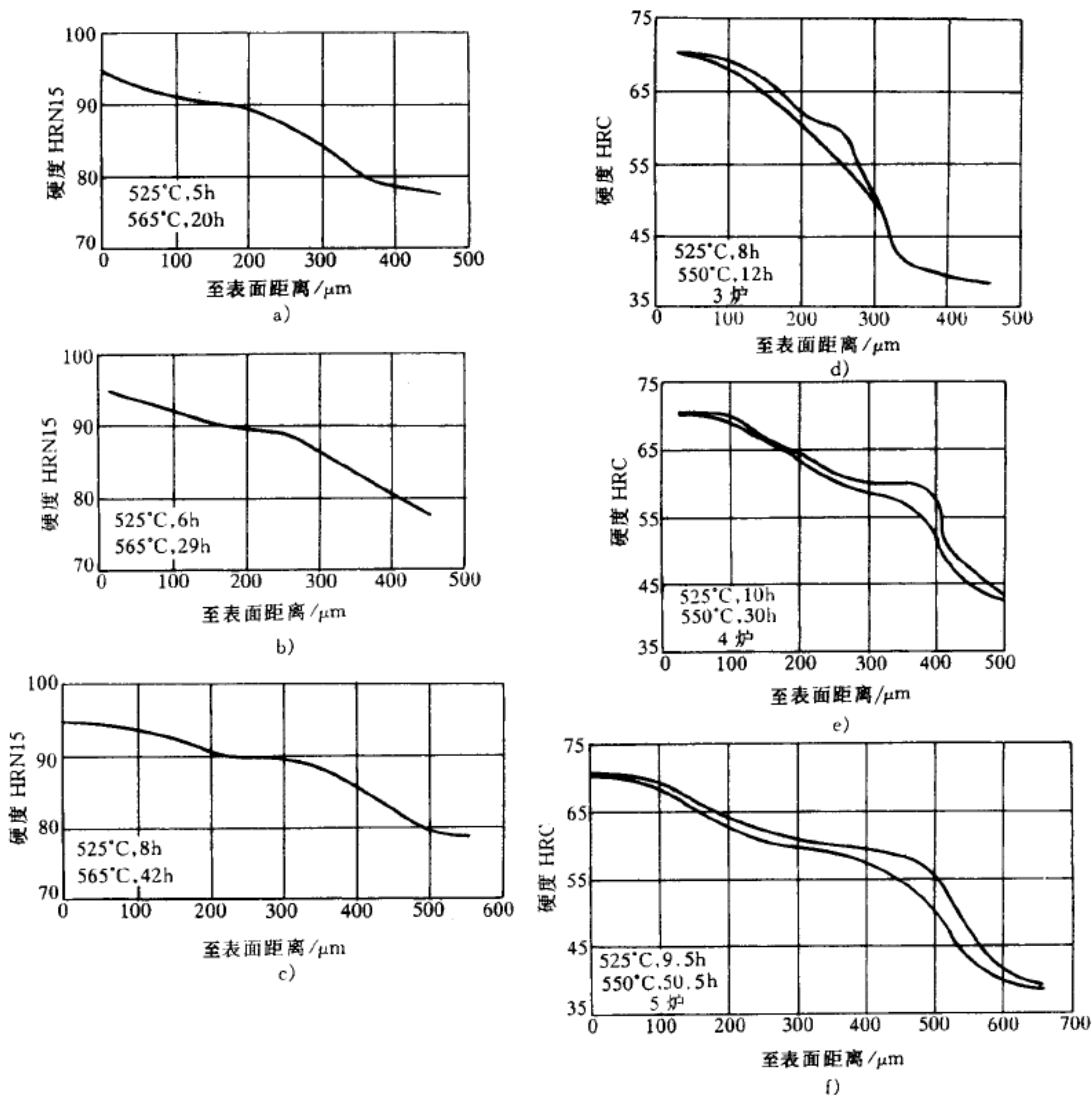


图 12-111 38CrMoAl (AMS6470) 钢两段渗氮后的硬度梯度

a) ~ c) 材料渗氮第一阶段分解率为 15% ~ 20%, 第二阶段为 60% ~ 70%

d) ~ f) 材料渗氮第一阶段分解率为 25% ~ 28%, 第二阶段为 75% ~ 80%,

材料是由自耗电极真空电弧重熔法冶炼

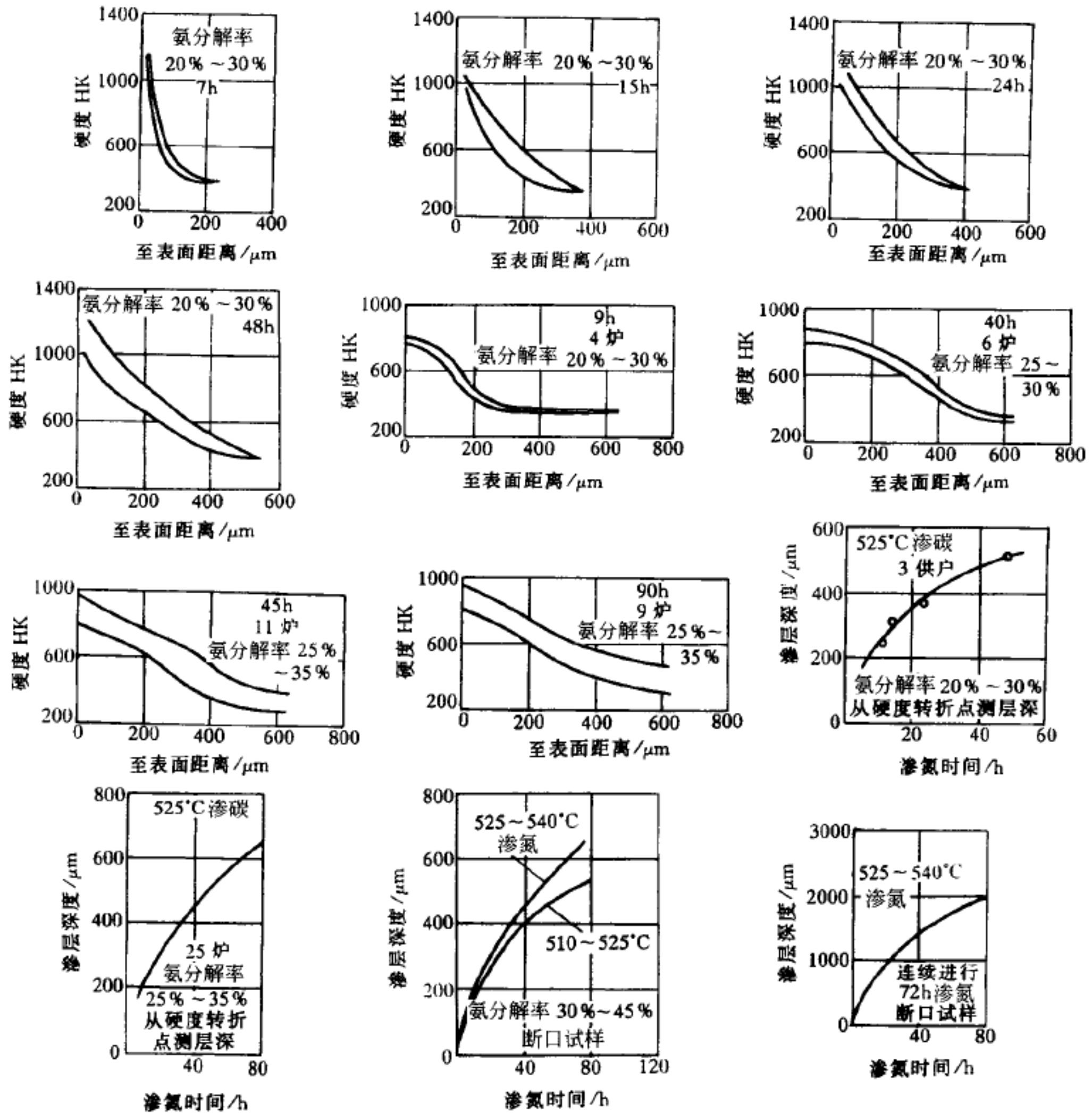


图 12-112 一段渗氮含铝 38CrMoAl (SAE7140) 钢的硬度梯度和渗层深度的关系

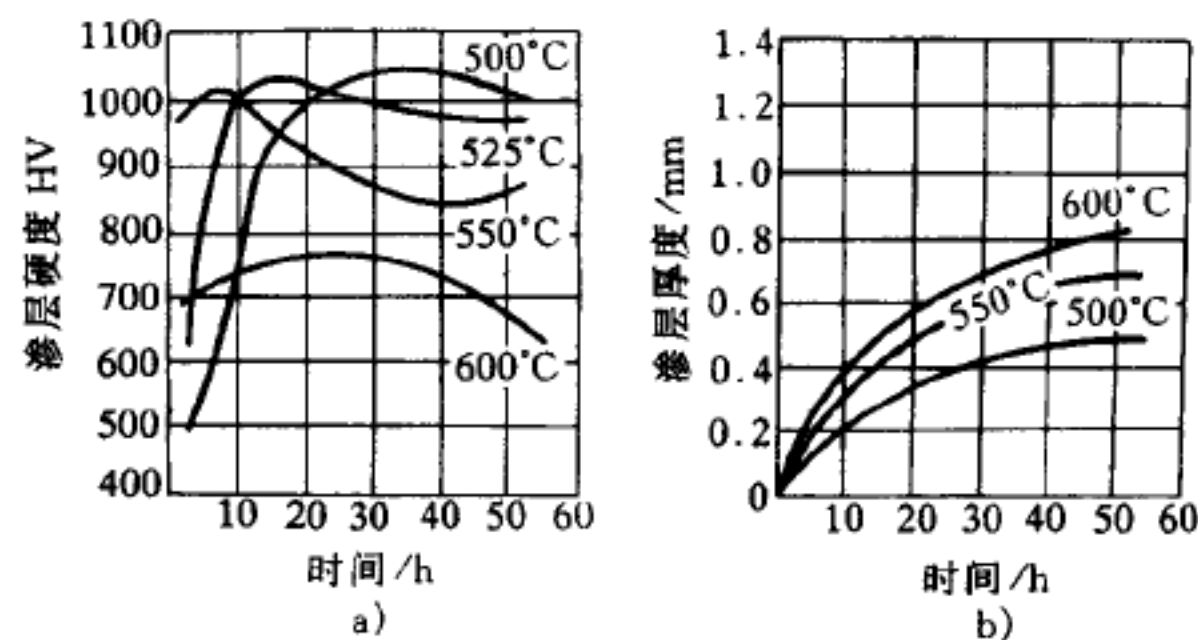


图 12-113 38CrMoAl 钢渗氮温度 a) 和时间 b) 对渗氮层硬度和厚度的影响

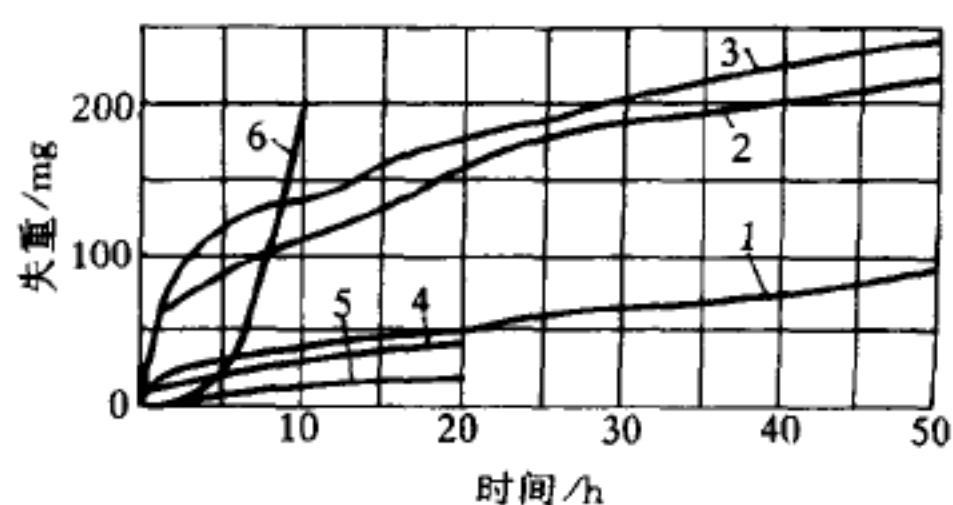


图 12-114 渗氮工艺参数对 38CrMoAlA 钢抗空蚀性能的影响

1—525℃, 渗氮 35h 2—510℃, 12h + 540℃, 40h 双程渗氮 3—按工艺 2 重复渗氮 6 次
4—按工艺 2 渗氮后喷砂 5—按工艺 2 渗氮后磨去疏松层 6—调质处理

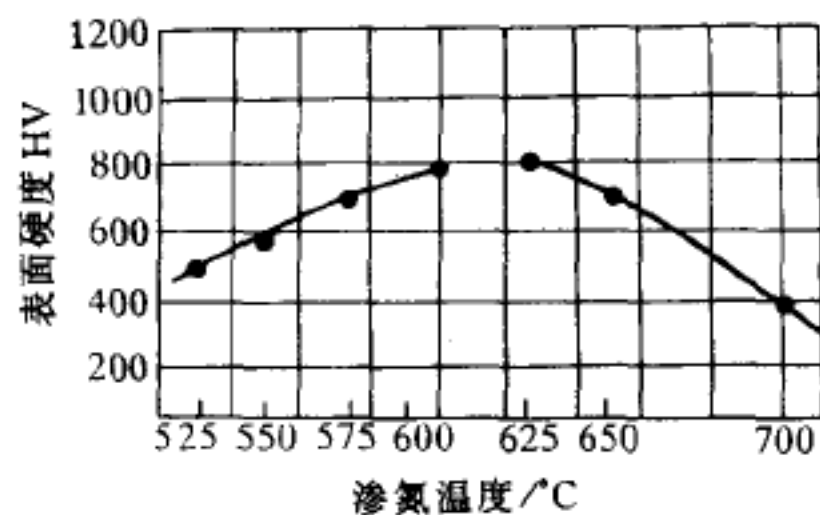


图 12-115 T7 钢表面硬度与渗氮温度的关系 (渗氮 2h)

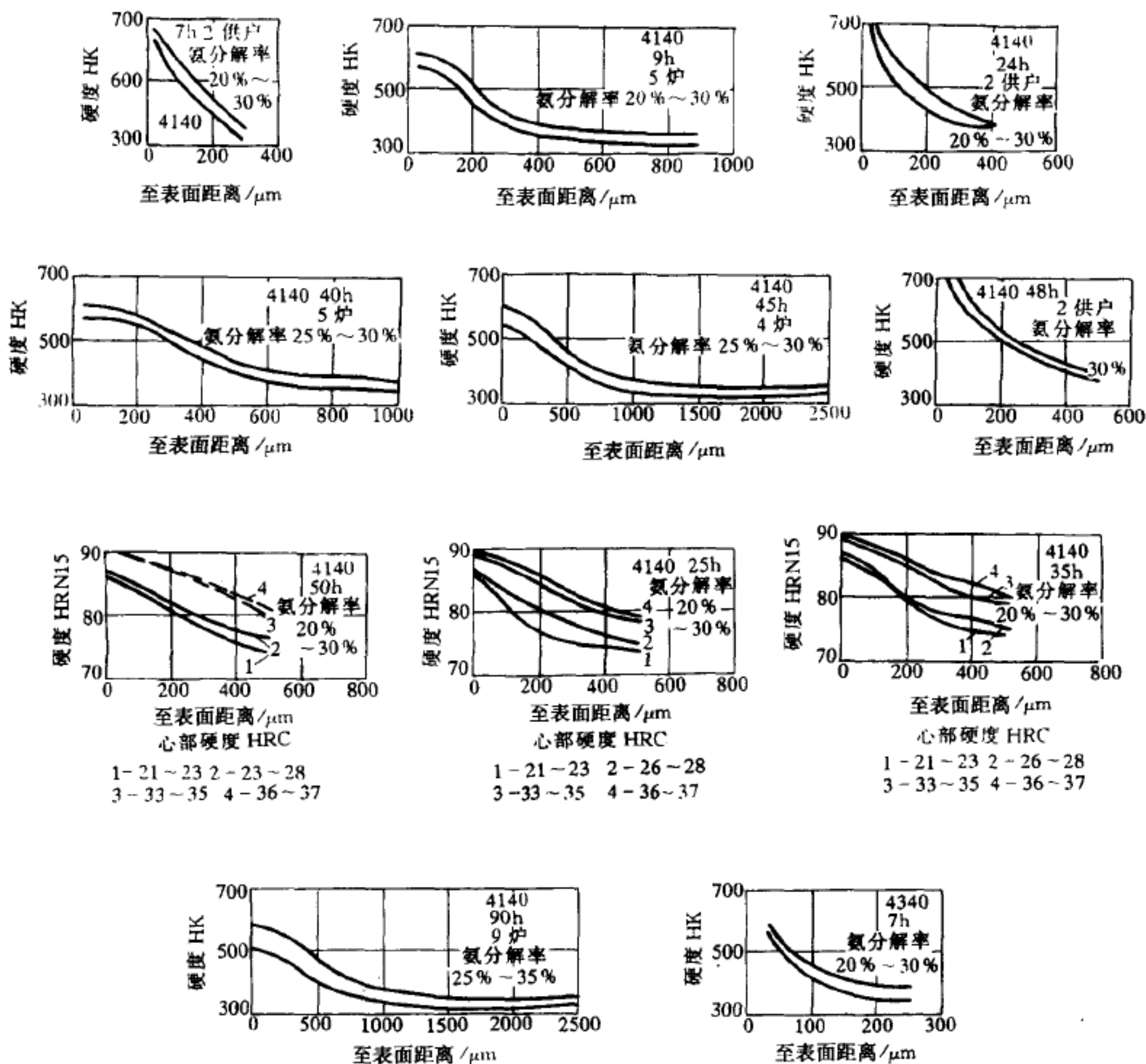


图 12-116 渗氮含铬低合金钢的硬度梯度

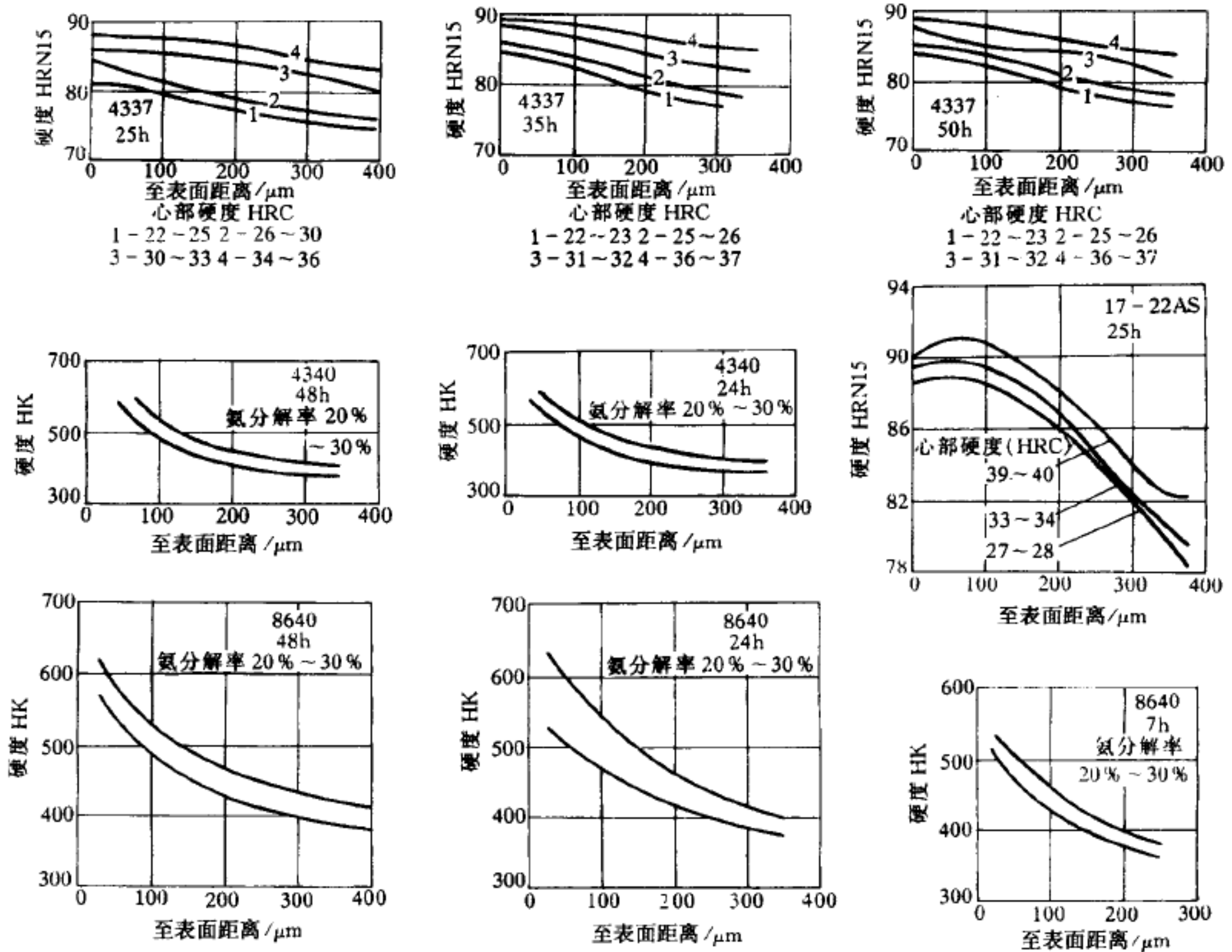


图 12-116 (续)

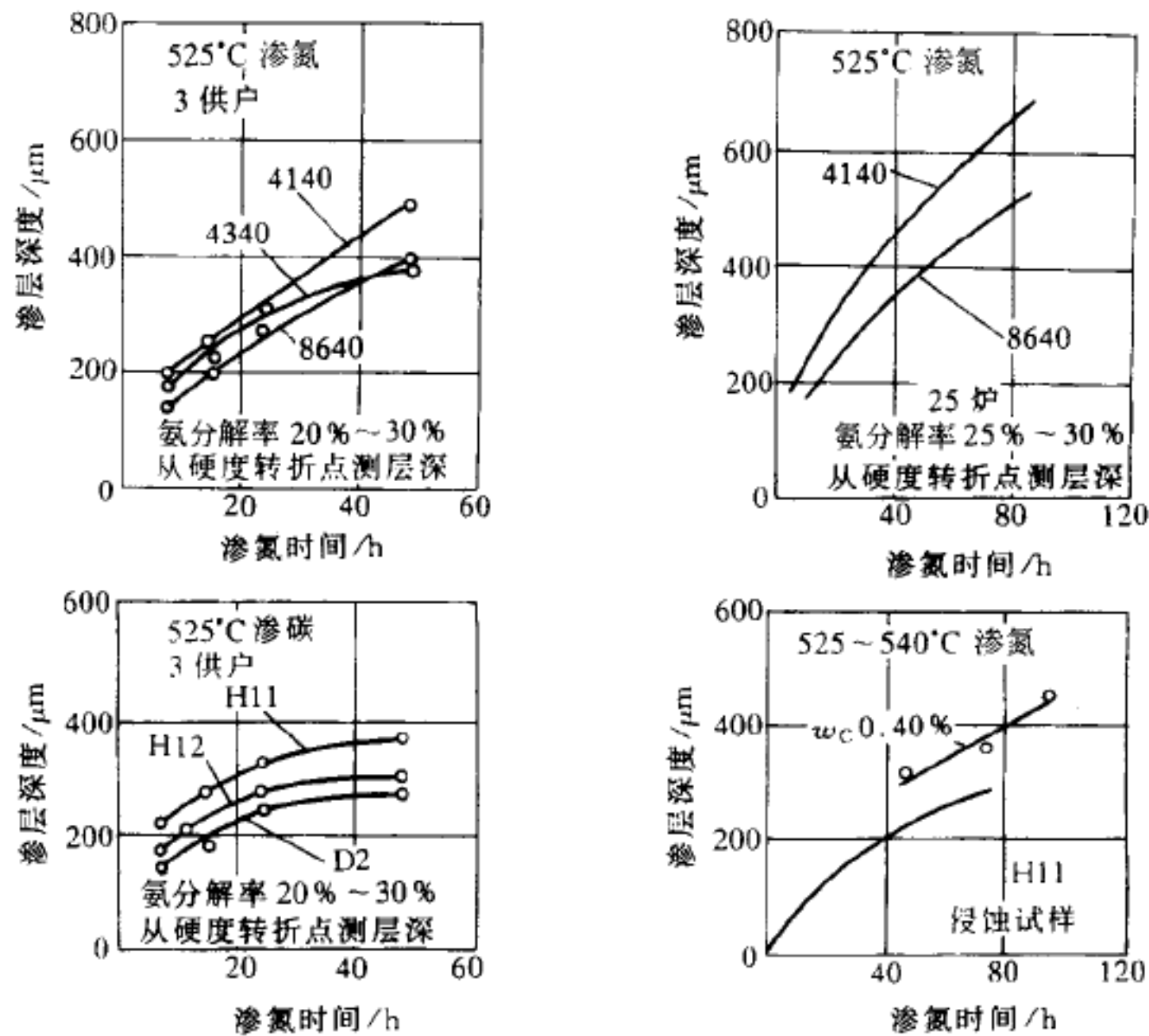


图 12-117 含铬低合金工具钢渗层深度与渗氮时间的关系

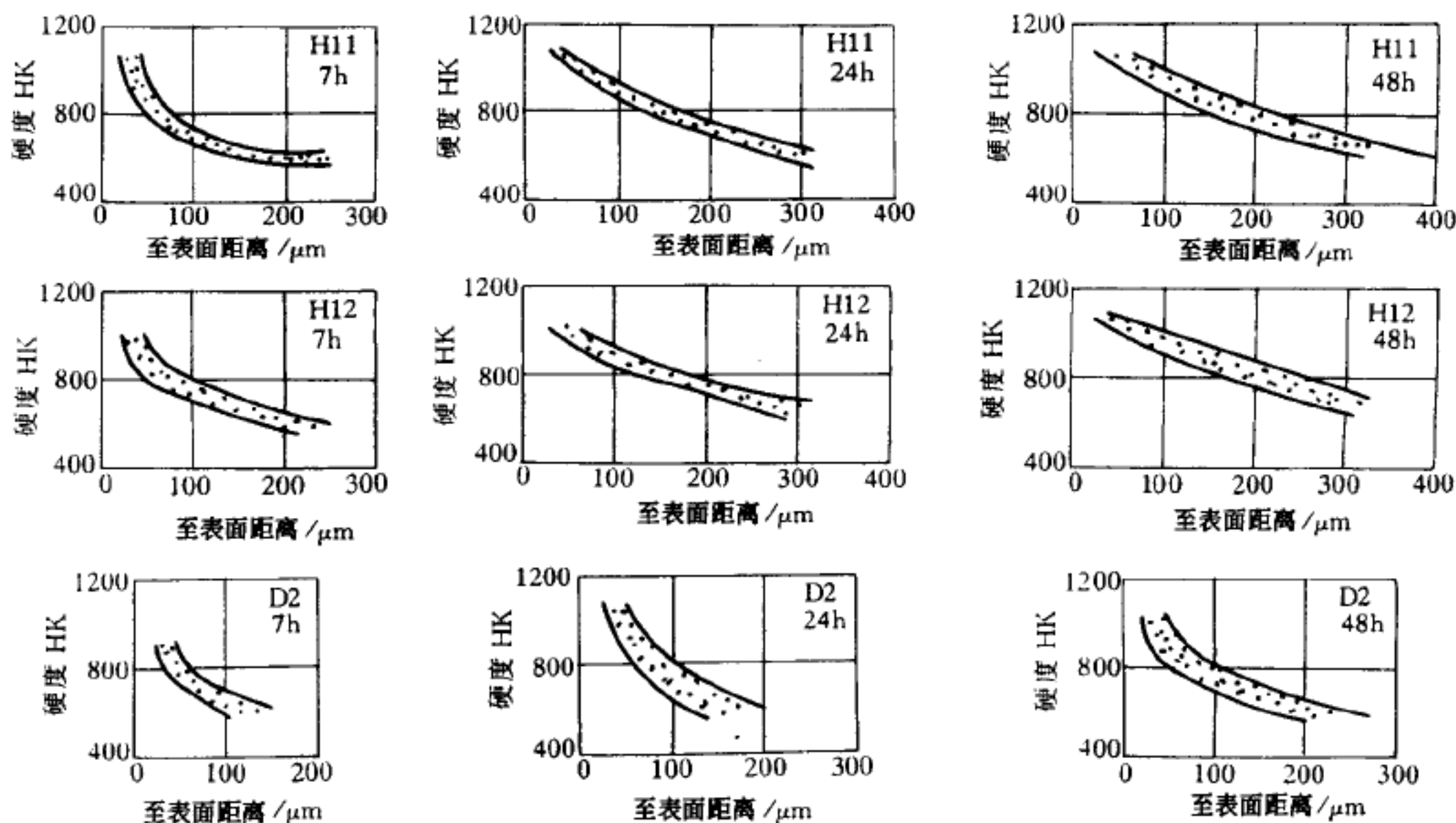


图 12-118 含铬工具钢的硬度梯度

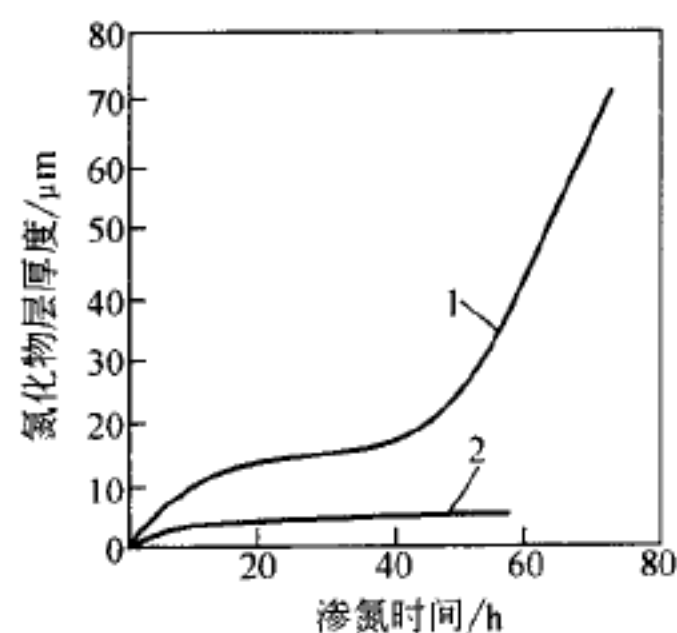
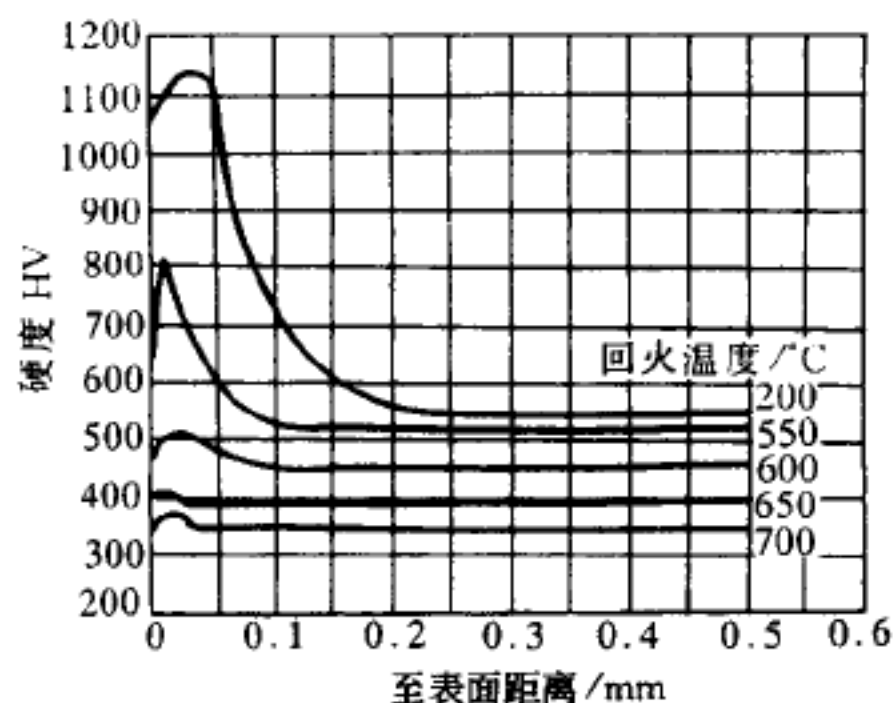
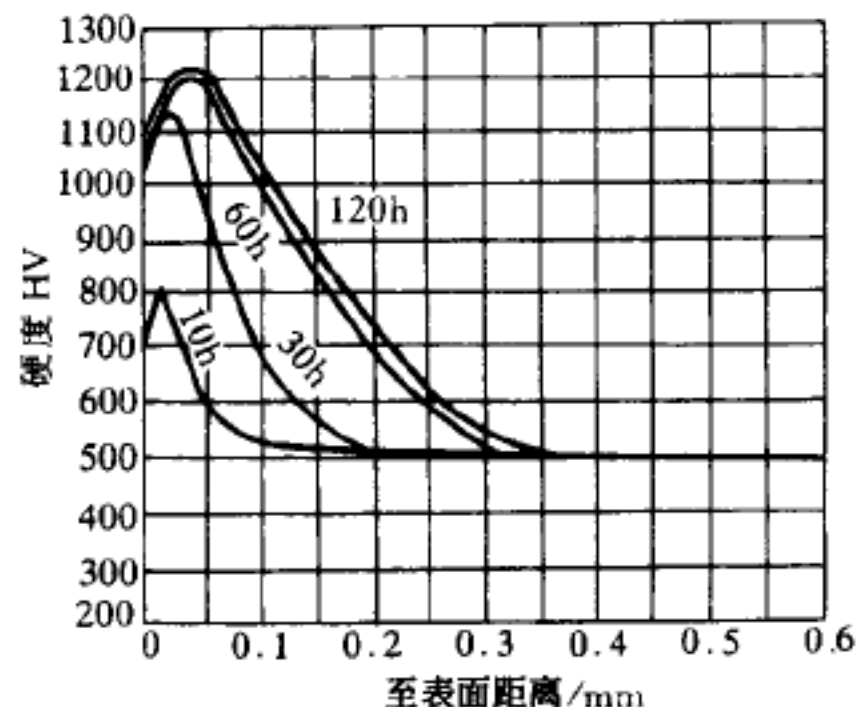


图 12-119 40CrNiMo 钢在 525℃ 渗氮时的氮化物层增长动力学曲线

1—气体渗氮 2—离子渗氮

图 12-120 Cr12 (D6) 钢不同温度气体
渗氮后的硬度分布(渗氮工艺: 510℃ × 10h; 试样预先
处理: 980℃ 淬火, 图示各温度回火)图 12-121 Cr12 钢 (D6) 气体渗氮不同
时间后的硬度分布(渗氮温度: 510℃; 预先热处理:
980℃ 淬火, 550℃ 回火)

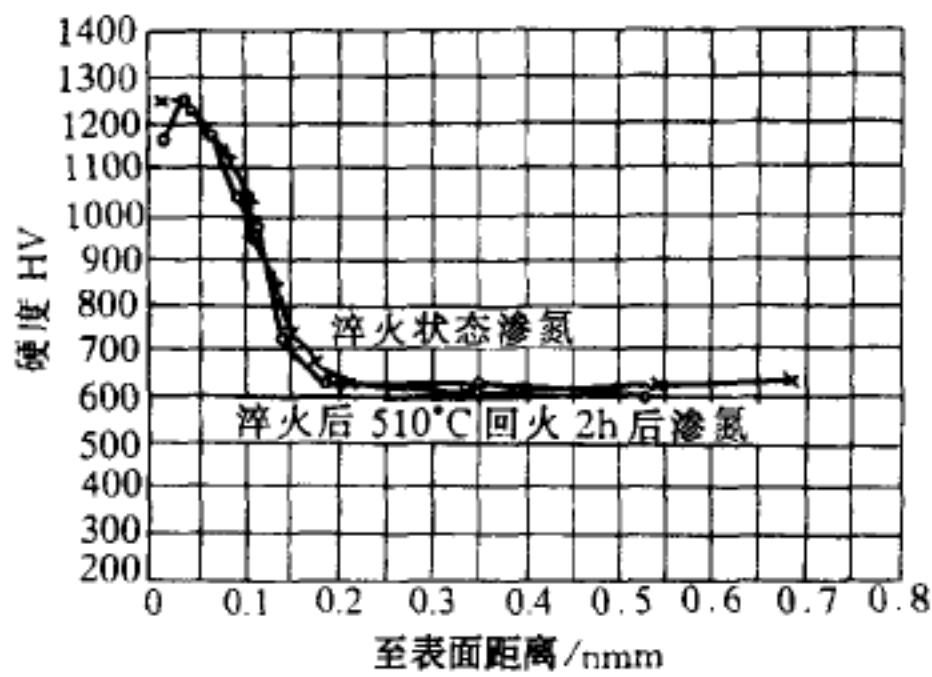


图 12-122 Cr12MoV 钢气体渗氮后的硬度分布
(渗氮工艺: $510^{\circ}\text{C} \times 30\text{h}$; 试样预先经 1050°C 油淬; 淬火后直接渗氮和淬火后经 $510^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$ 回火后再渗氮)

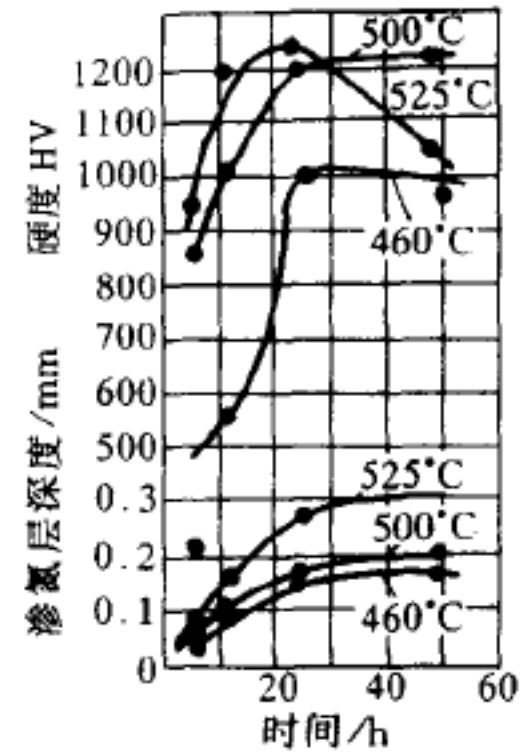


图 12-123 Cr12MoV 钢气体渗氮温度和时间对硬度和渗氮层深度的影响

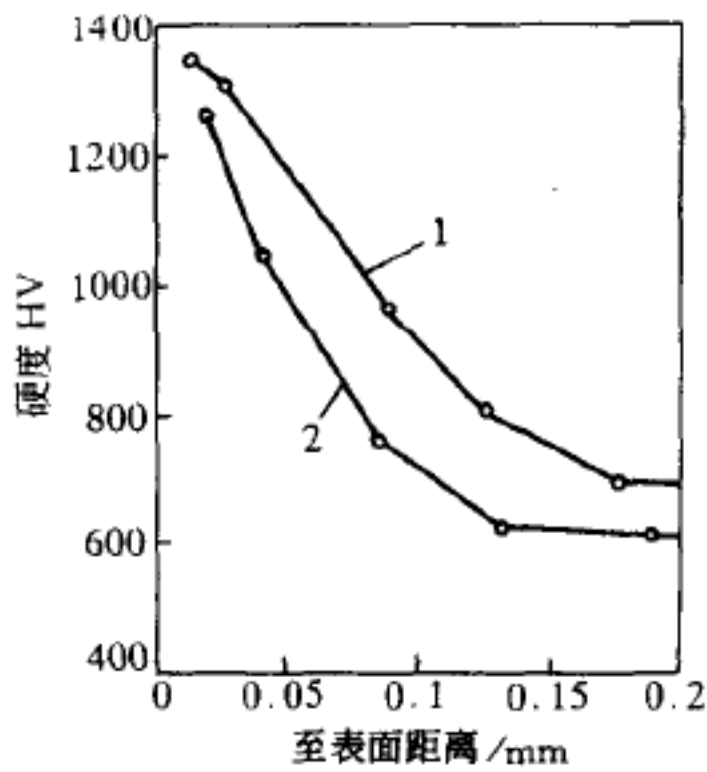


图 12-124 Cr12MoV 钢离子渗氮后的硬度分布
1— $450^{\circ}\text{C} \times 30\text{h}$ 2— $500^{\circ}\text{C} \times 12\text{h}$

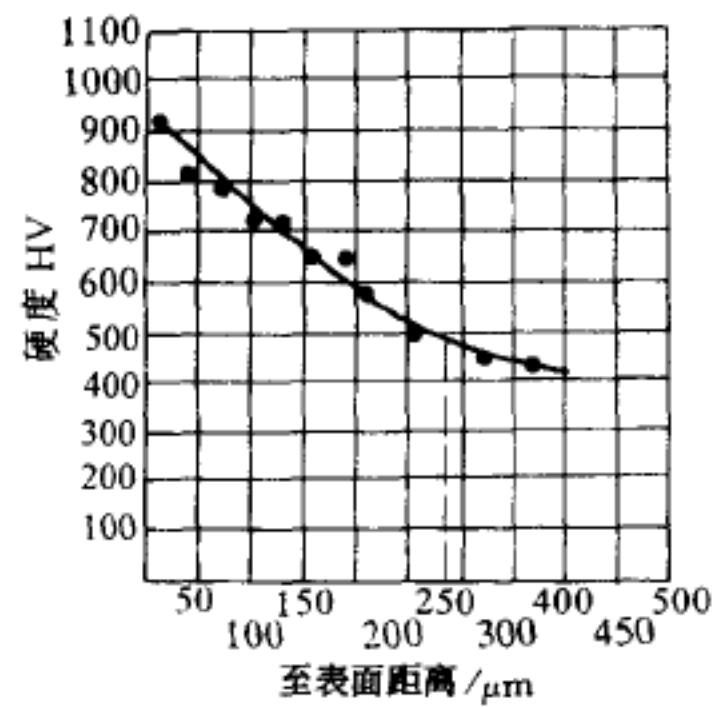


图 12-125 3Cr2W8V 钢离子渗氮后的硬度分布

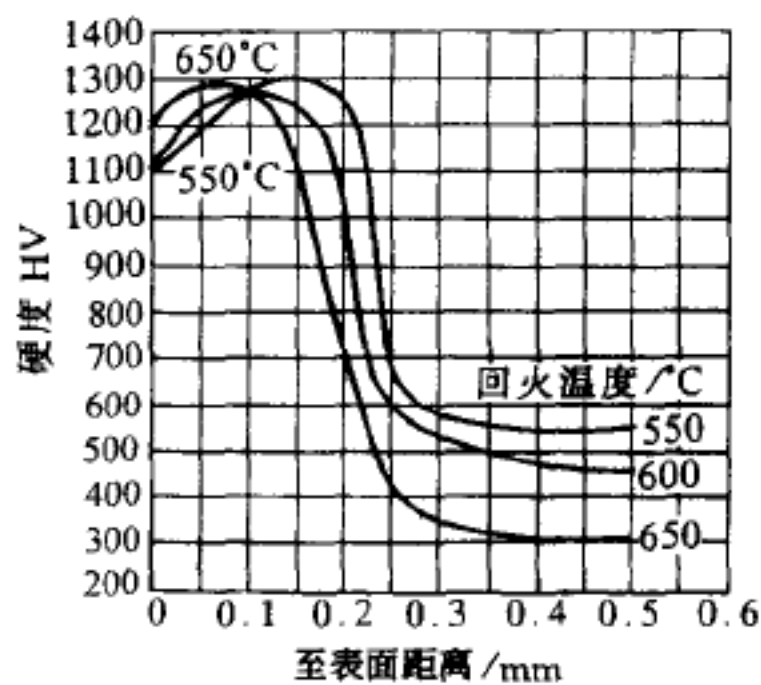


图 12-126 4Cr5MoV1Si (H13) 钢淬火经不同温度回火后, 于 $525^{\circ}\text{C} \times 30\text{h}$ 气体渗氮后的硬度分布

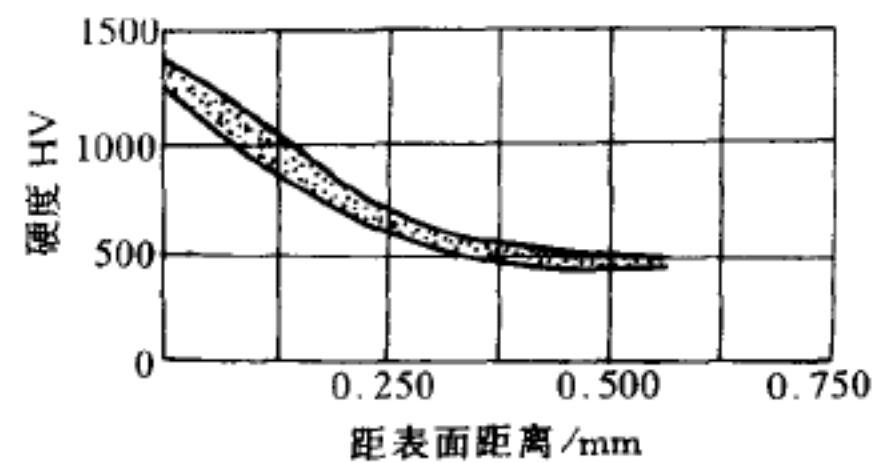


图 12-127 3Cr5WMoVSi (H12) 钢渗氮后的硬度分布
(渗氮规范: $525^{\circ}\text{C} \times 48\text{h}$)

3. 脉冲电源与离子渗氮(碳)设备参数(表12-112~表12-124)

表 12-112 三相全波全控桥基本电路数值

导通角	输出波形数值					晶闸管整流器数值						变压器特性	
	电压波形	$\frac{E_D}{E_L}$	直流电压/V	波形系数	电流波纹	电流波形	θ	$\frac{I_F}{I_D}$	$\frac{I_V}{I_{RMS}}$	$\frac{V_{FRM}}{E_1}$	$\frac{V_{RM}}{E_1}$	EH	功率因数
0°		1.35	1.35	1.002	4.6%		120°	0.333	0.577	0	1.41	99.5	0.951
30°		1.16	1.165	1.015	15.3%		120°	0.333	0.56	0.745	1.41	96.5	0.8
60°		1.67	0.67	1.1	26.8%		60° 双脉冲	0.333	0.52	1.192	1.41	77	0.54
90°		0.133	0.133	1.6	17.3%		30° 双脉冲	0.333	0.36	1.29	1.41	37.5	0.20
120°		0	0	0	0		0	0	0	1.41	1.41	0	0

表 12-113 三相半控桥基本电路数值

导通角	输出波形数值					晶闸管整流器数值						变压器	
	电压波形	$\frac{E_D}{E_L}$	$\frac{E_A}{E_L}$	波形系数	电流波纹	电流波形	$\frac{I_V}{I_{FM}}$	$\frac{I_{RMS}}{I_D}$	$\frac{V_{FBM}}{E_1}$	$\frac{I_F}{I_D}$	$\frac{V_{RM}}{E_1}$	$P_{R1} \times \frac{E_D}{E_D I_D}$	$S_{E0} \times \frac{E_D}{E_D I_D}$
0°		1.35	1.35	1.002	4.6%		0.318	0.579	0	0.333	1.41	1.05	1.05
30°		1.26	1.28	1.015	17.3%		0.297	0.584	0.707	0.333	1.41	1.13	1.13
60°		1.01	1.07	1.06	35.2%		0.242	0.615	1.22	0.333	1.41	1.48	1.48
90°		0.675	0.846	1.25	75%		0.161	0.729	1.41	0.333	1.41	2.70	2.70
120°		0.337	0.531	1.58	122%		0.093	1.11	1.41	0.333	1.22	4.80	4.80
150°		0.091	0.210	2.31	208%		0.042	1.35	1.41	0.333	0.707	9.18	9.18

表 12-114 逆变型脉冲电源主要技术参数

型号	频率/kHz	电压/V	最大峰值电流/A	导通比(α)	灭弧时间/ μ s
LDM25	10~30	0~1500	25	0.15~0.85	≤ 10
LDM40	10~30	0~1500	40	0.15~0.85	≤ 10
LDM80	10~30	0~1000	80	0.15~0.85	≤ 10
LDM120	10~15	0~1000	120	0.15~0.85	≤ 15
LDM160	10~15	0~1000	160	0.15~0.85	≤ 15

表 12-115 斩波型脉冲电源主要技术参数

项目	频率 /Hz	电压 /V	峰值电流 /A	导通比 (α)	灭弧时间 / μ s
数值	1000	0 ~ 1000	50 ~ 300	0.15 ~ 0.85	20 ~ 60

表 12-116 逆变型脉冲电源技术参数

项目	频率 /kHz	电压 /V	峰值电流 /A	导通比 (α)	灭弧时间 / μ s
数值	10 ~ 30	0 ~ 1500	30 ~ 50	0.15 ~ 0.85	≤ 10
		0 ~ 1000	30 ~ 75		

表 12-117 LD 型离子渗氮炉技术规格表

型号	额定 电流 /A	额定 电压 /V	相数	最高工 作温度 /℃	炉腔或空炉尺寸 /mm × mm	外形尺寸 /mm × mm	电炉 重量 /kg	备注
LD2—25	25	380	3	650	$\phi 810 \times 800$	$\phi 1240 \times 2000$	1600	堆放普通型
LD2—25B	25	380	3	650	$\phi 810 \times 800$	$\phi 1240 \times 2000$	1600	堆放半自动型
LD2—50	50	380	3	650	$\phi 1060 \times 1100$	$\phi 1557 \times 2350$	2730	堆放普通型
LD2—50B	50	380	3	650	$\phi 1060 \times 1100$	$\phi 1557 \times 2350$	2730	堆放半自动型
LD2—50J	50	380	3	650	$\phi 770 \times 1720$	$\phi 1240 \times 2695$	2270	井式普通型
LD2—50JB	50	380	3	650	$\phi 770 \times 1720$	$\phi 1240 \times 2695$	2270	井式半自动型
LD2—50Z	50	380	3	650	$\phi 770 \times 1720$	$\phi 1240 \times 2695$	2350	堆吊综合普通型
LD2—502B	50	380	3	650	$\phi 770 \times 1720$	$\phi 1240 \times 2695$	2350	堆吊综合半自动型
LD2—100	100	380	3	650	$\phi 1300 \times 1340$	$\phi 1875 \times 2800$	5000	堆放普通型
LD2—100B	100	380	3	650	$\phi 1300 \times 1340$	$\phi 1875 \times 2800$	5000	堆放半自动型
LD2—100J	100	380	3	650	$\phi 770 \times 2720$	$\phi 1240 \times 3710$	3010	井式普通型
LD2—100JB	100	380	3	650	$\phi 770 \times 2720$	$\phi 1240 \times 3710$	3010	井式半自动型
LD2—150JB	150	380	3	650	$\phi 1000 \times 4000$	$\phi 1670 \times 5200$	5500	井式半自动型
LD2—500B	500	380	3	650	$\phi 1700 \times 1600$	$\phi 2400 \times 3350$	11000	堆放半自动型
LTD—10	10	380	3	950	$\phi 360 \times 360$	1100 × 800 × 1400	1000	液压升降

表 12-118 HZTQ 型真空离子渗碳高压气淬炉技术规格

序号	有效加热区尺寸 /mm × mm × mm	最高温度 /℃	加热功率 /kW	直流电源功率 /kW	压升率 /Pa · h ⁻¹	气冷压强 /Pa
1	600 × 400 × 400	1300	80	25	0.67	5×10^5
2	900 × 600 × 600		150	50		
3	1100 × 700 × 700		200	50		

表 12-119 微机控制自动离子渗碳炉技术规格表

型 号	额定功率 /kW	工作空间尺寸 /mm × mm	额定温度 /℃
LDZ—25	25	φ900 × 900	650
LDZ—50	50	φ900 × 1800	
		φ1100 × 1100	
LDZ—100	100	φ900 × 2800	
		φ1400 × 1400	
LDZ—150	150	φ2000 × 2000	
LDZ—200	200	φ2200 × 2200	
LDZ—300	300	φ3000 × 4000	

表 12-120 双室真空离子渗碳炉技术规格

型 号	有效加热区尺寸 /mm × mm × mm	最高温度 /℃	加热功率 /kW	直流电源功率 /kW	压升率 /Pa·h ⁻¹
ZLSC—60A	500 × 350 × 300	1300	45	15	0.67
ZLT—30	450 × 300 × 250		30	20	0.67
ZLT—65	620 × 420 × 300		65	25	0.67
ZLT—100	1000 × 600 × 410		100	50	
HZCT—65	600 × 400 × 300		65	25	0.67
HZCT—100	900 × 600 × 410		100	50	

表 12-121 FIC 型真空离子渗碳炉技术规格

型 号	FIC—45	FIC—60	FIC—75
有效加热区/mm	450 × 675 × 300	600 × 900 × 400	750 × 1125 × 500
装炉量/kg	200	400	650
最高温度/℃	1150	1150	1150
处理时间/h	2	2.5	3
极限真空度/Pa	10 ⁻¹	10 ⁻¹	10 ⁻¹
冷却水消耗量/m ³ ·h ⁻¹	5	8	10
C ₃ H ₈ 消耗量/L·min ⁻¹	5	10	13
N ₂ 消耗量/m ³ 次 ⁻¹	3.5	4.5	6
淬火油量/m ³			

注：选自日本真空技术株式会社产品。

表 12-122 双层辉光离子渗金属炉技术参数

项 目	参 数	项 目	参 数
加热室有效尺寸/mm	1000 × 500 × 300 (长 × 宽 × 高)	最大装炉量/kg	150
		工件最高处理温度/℃	1100
处理最大钢板平面尺寸/mm × mm	500 × 1000	源极最高工作温度/℃	1300
处理锯条最大容积/mm × mm × mm	1000 × 500 × 300	控制精度/℃	± 5
		冷炉极限真空度/Pa	0.4

(续)

项 目	参 数	项 目	参 数
1100℃热炉真空度/Pa	2.67	升温时间/min (升至 1100℃)	漏装炉升温时间 180
压升率/Pa·min ⁻¹	0.67×10^{-3}	辉光电源功率/kW	100
工作气压/Pa	13.33 (真空仪表读数)	交流加热电源功率/kW	30

表 12-123 各种灭弧方法的特性





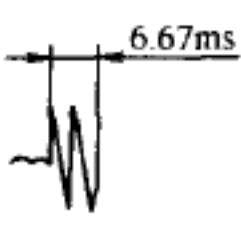
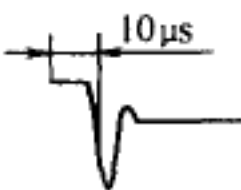
灭弧方式	弧光放电现象	电流波形	灭弧时间
无灭弧措施 (或措施失效)	辉光熄灭, 白色弧光成团, 弥散在打弧周围, 并转移到阴极其他部位, 一定时间后自行跳闸		电流迅速增加 有限流电阻时小弧光放电, 秒级自行熄灭, 大弧光放电时跳闸
串联大电阻降压	辉光熄灭, 在打弧点周围有成团弧光, 维持一定时间, 自行熄灭		电流增加到一定程度, 形成转弧或电流增加, 致使电压下降到起弧电压以下, 即熄灭, 10 ⁻¹ s 级
电流截止负反馈	辉光熄灭, 小团弧光集中在打弧点, 并向周围成堆状散发, 即行熄灭		与截止点远近有关, 最长为 6.67ms (10 ⁻³ s 级)
LC 振荡	不感觉辉光熄灭, 在打弧点周围继续成片白色弧光, 配合截止反馈时, 弧光增加, 即行熄灭, 有时产生转弧		单次可达 10 ⁻⁴ s, 按 $t \approx \pi \sqrt{LC}$ 计算, 大电流的截止时间 10 ⁻⁴ s
旁路晶闸管	不感觉辉光熄灭, 在打弧点周围, 继续多次弧光, 配合截止负反馈即行熄灭, 有时产生转弧		单次可达 10 ⁻⁴ s 级, 重复加电压又再次打弧, 大电流截止时间 10 ⁻⁴ s
电子开关	在打弧点有一小白点弧光, 即行熄灭		一次灭弧, 可达 10 ⁻⁵ s 级

表 12-124 离子渗氮炉常见故障及排除

现 象	原因分析	排除方法
流量计浮子贴玻璃管壁	1. 气源水分含量太高 2. 管道太长	1. 更换气源加干燥罐 2. 尽量缩短管道
流量计浮子自动下降	1. 进气或出气管有一端堵塞 2. 调节阀变形 3. 供气不足或没有供气	1. 弄通管道 2. 先开大, 再关小或更换针阀 3. 充分供气
真空泵抽气, 抽到一定值, 抽不上去, 关闭阀门压升率很大	1. 炉子或管道漏气 2. 密封圈老化漏气	1. 检查、补漏 2. 更换
同上, 但压升率不大	1. 真空泵油太少或老化 2. 真空泵内腔或括板损坏	1. 加油或换油 2. 大修真空泵
阴极输电装置定点打弧	1. 密封处有漏气 2. 护隙破坏	1. 紧固, 防止漏气 2. 调整
外给电压给不止而电流剧增	排除电源原因, 阴阳极间绝缘损坏, 有短路处	检查, 排除

12.4 碳氮共渗工艺及性能（表 12-125 ~ 表 12-140 和图 12-128 ~ 图 12-160）

表 12-125 碳氮共渗方法的原理、工艺和适用范围

共渗方式	原 理	渗 剂	渗后热处理	适用范围
液体法	1. $\text{BaCl}_2 + 2\text{NaCN} \rightarrow 2\text{NaCl} + \text{Ba}(\text{CN})_2$ $\text{Ba}(\text{CN})_2 \rightarrow \text{BaCN}_2 + [\text{C}]$ $\text{BaCN}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{BaO} + \text{CO} + 2[\text{N}]$	NaCN 、 NaCl 、 BaCl_2 混合熔化, 在 850 ~ 900℃ 使用	渗后直接淬火、低温回火	手工锯条、锉刀等批量生产的中小件, 效率高, 质量均匀。氰盐有剧毒, 使用时要注意防护, 用后的废盐、废水需妥善无害化处理后才可排放。尿素浴原料无毒。但反应产物仍有毒, 必须注意
	2. $2(\text{NH}_2)_2\text{CO} + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow 2\text{NaCNO} + 2\text{NH}_3 + \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ $4\text{NaCNO} \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + 2\text{NaCN} + 2[\text{N}] + \text{CO}$ $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + [\text{C}]$ $\text{NaCN} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{NaCNO} + \text{CO}$	尿素 $[(\text{NH}_2)_2\text{CO}]$ 和碳酸盐混合, 少量添加在坩锅中逐步熔化, 最后加 KCl , 在 850 ~ 900℃ 使用		
气体法	1. 滴注法 含 C·N 液体有机化合物分别装于各个容器, 通过针阀滴入炉内裂解, 炉温 850 ~ 900℃	甲醇 + 丙酮 + 氨, 三乙醇胺, 甲醇 + 三乙醇胺, 煤油 + 氨	在井式炉中进行共渗后, 工件吊至冷却罐中冷至室温取出。重新加热淬火。在密封箱式炉中, 共渗后可直接淬火, 最后低温回火 (180 ~ 200℃)	各种要求高抗疲劳性能, 耐磨的零件
	2. 固体投放法 将固体渗剂压制成药球状或片状, 定时投入炉中于 850 ~ 900℃ 裂解	尿素		
	3. 通入气体法 共渗温度 850 ~ 900℃	吸热式气 + 甲烷 (或丙烷) + 氨		

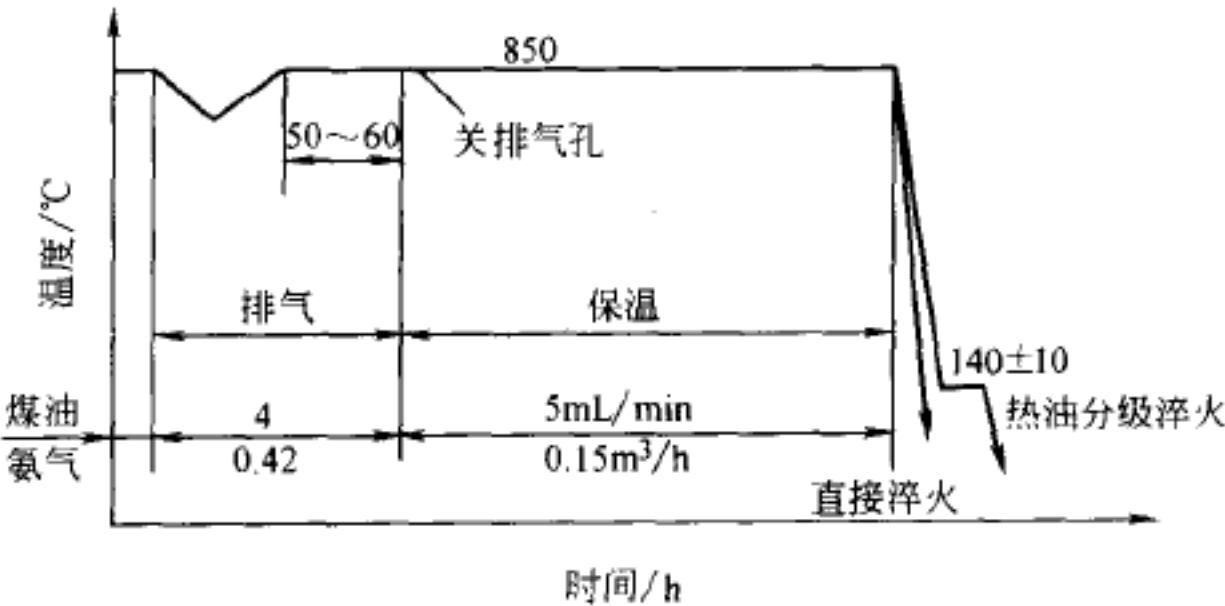


图 12-128 40Cr 钢气体碳氮共渗工艺曲线

表 12-126 常用结构钢碳氮共渗处理规范及性能

钢 号	渗碳共渗 温度/℃	淬 火		回 火		表面硬度 HRC
		温度/℃	介质	温度/℃	介质	
25MnTiB	840 ~ 860	降至 800 ~ 830	碱浴	180 ~ 200	空气	≥ 60
24SiMnMoVA	840 ~ 860	降至 820 ~ 840	油	160 ~ 180	空气	≥ 59
40Cr	830 ~ 850	直接	油	140 ~ 200	空气	≥ 48
15CrMo	830 ~ 860	780 ~ 830	油或碱浴	180 ~ 200	空气	≥ 55
20CrMnMo	830 ~ 860	780 ~ 830	油或碱浴	160 ~ 200	空气	≥ 60

(续)

钢 号	渗碳共渗 温度/℃	淬 火		回 火		表面硬度 HRC
		温度/℃	介质	温度/℃	介质	
12CrNi2A	830 ~ 860	直接	油	150 ~ 180	空气	≥ 58
12CrNi3A	840 ~ 860	直接	油	150 ~ 180	空气	≥ 58
20CrNi3A	820 ~ 860	直接	油	150 ~ 180	空气	≥ 58
30CrNi3A	810 ~ 830	直接	油	160 ~ 200	空气	≥ 58
12Cr2Ni4A	840 ~ 860	直接	油	150 ~ 180	空气	≥ 58
20Cr2Ni4A	820 ~ 850	直接	油	150 ~ 180	空气	≥ 58
20CrNiMo	820 ~ 840	直接	油	150 ~ 180	空气	≥ 58
20Ni4Mo	820	直接	油	150 ~ 180	空气	≥ 56

表 12-127 JT—60 井式炉碳氮共渗工艺

零件材料	氨 气 /m ³ ·h ⁻¹	液化气 /m ³ ·h ⁻¹	吸热式气体 ^① /m ³ ·h ⁻¹		温度/℃	淬火介质	碳氮共渗层深 与时间计算: $x = k\sqrt{t}$	
			装炉 20min	20min 后			材料	k 值
15Cr、20Cr 40Cr 16Mn 18CrMnTi	0.05	0.1	5.0	5.0	上区 870 下区 860	油	20 20Cr 18CrMnTi	0.28 0.38 0.32
Y12, 08 20, 35	0.05	0.15	5.0	0.5		碱水	40Cr	0.37

① 吸热式气体成分 (体积分数) (%): CO₂ ≤ 1.0, O₂ 0.6, C_nH_{2n} 0.6, CO 26, CH₄ 4 ~ 8, H₂ 16 ~ 18, N₂ 余量。

表 12-128 碳氮共渗时的气体成分 (体积分数) (%)

C _n H _{2n+2}	C _n H _{2n}	CO	H ₂	CO ₂	O ₂	N ₂
6 ~ 10	≤ 0.5	5 ~ 10	60 ~ 80	≤ 0.5	≤ 0.5	余量

表 12-129 采用甲醇、煤油、液氨碳氮共渗时的共渗剂用量

设备型号	排气保温	碳氮共渗	
	甲醇/ (d/min)	煤油/ (d/min)	氨气/ (m ³ /h)
RJJ—35—9T	100	55	0.08
RJJ—60—9T	120	60	0.1
RJJ—75—9T	160	90	0.17

表 12-130 在 830℃ 碳氮共渗的持续时间 (τ) 对渗层的厚度 (h) 和硬度的影响

τ/h	气体介质 数量/L	NH ₃ 含量 (%)		冷却介质	h/mm	在下列载荷 (N) 时 的硬度 HRC	
		在混合气中	在废气中			600	1500
1	135	22.2	4.0	水 空气	0.16 0.08	69 50	— —
2	265	22.6	4.5	水 空气	0.30 0.18	80 68	60 —
3	376	23.1	4.5	水 空气	0.55 0.60	80 74	62 46
4	510	24.0	4.8	水 空气	1.00 1.00	80 77	62 53

表 12-131 结构钢碳氮共渗的盐浴成分及处理规范

盐浴成分 (%) (质量分数)	处理温度/℃	处理时间/h	渗层厚度/mm	附 注
NaCN50, NaCl50, (NaCN20 ~ 25, NaCl25 ~ 50, Na ₂ CO ₃ 25 ~ 50) ^①	840	0.5	0.15 ~ 0.2	碳氮共渗后从盐浴中取出直接淬火, 然后在 180 ~ 200℃ 回火
	840	1.0	0.3 ~ 0.25	
	870	0.5	0.2 ~ 0.25	
	870	1.0	0.25 ~ 0.35	
NaCN10, NaCl40, BaCl ₂ 50 (NaCN8 ~ 12, NaCl30 ~ 55, BaCl ₂ ≤ 10 ~ 15) ^②	840	1.0 ~ 1.5	0.25 ~ 0.3	零件碳氮共渗后在空气中冷却, 然后在盐浴中或者炉中加热淬火, 并在 180 ~ 200℃ 回火, 渗层中氮含量为 0.2% ~ 0.3%, 碳含量为 0.8% ~ 1.2%, 表面硬度 58 ~ 64HRC
	900	1.0	0.3 ~ 0.5	
	900	2.0	0.7 ~ 0.8	
	900	4.0	1.0 ~ 1.2	
NaCN8, NaCl10, BaCl ₂ 82 (NaCN3 ~ 8, BaCl ₂ ≥ 30, NaCl ≥ 30, BaCO ₃ ≥ 40)	900	0.5	0.2 ~ 0.25	同上, 浴面用石墨覆盖, 以避免碳氮共渗盐浴热量和碳的损耗
	900	1.5	0.5 ~ 0.8	
	950	2.0	0.8 ~ 1.1	
	950	3.0	1.0 ~ 1.2	
	950	5.5	1.4 ~ 1.6	

① 括号内给出的是盐浴工作成分。

② 操作过程中盐浴活性下降。应周期性地添加氰化钠 (纯度 90% ~ 95%) 使盐浴活性再生, 通常用 NaCN/BaCl₂ 为 1/4 进行再生。

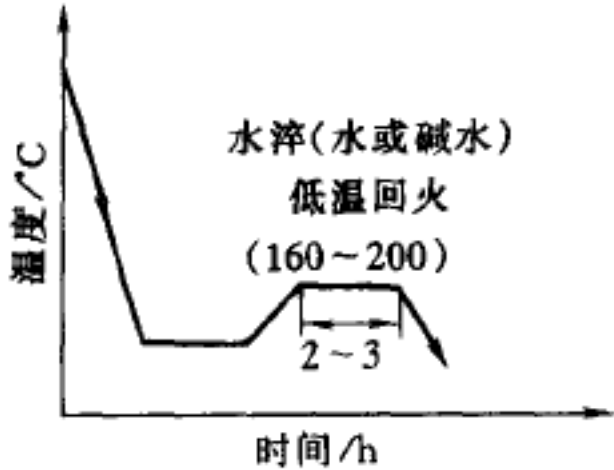
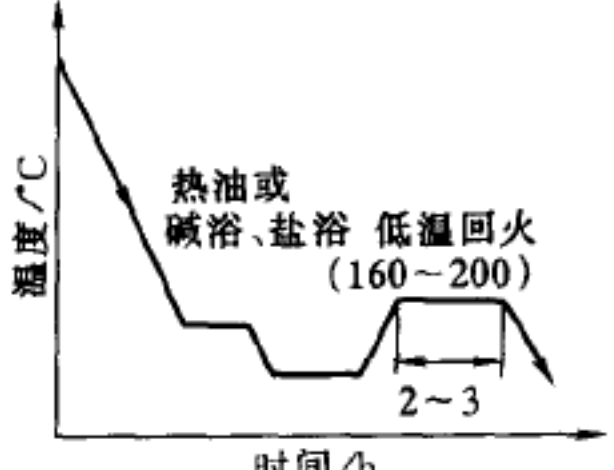
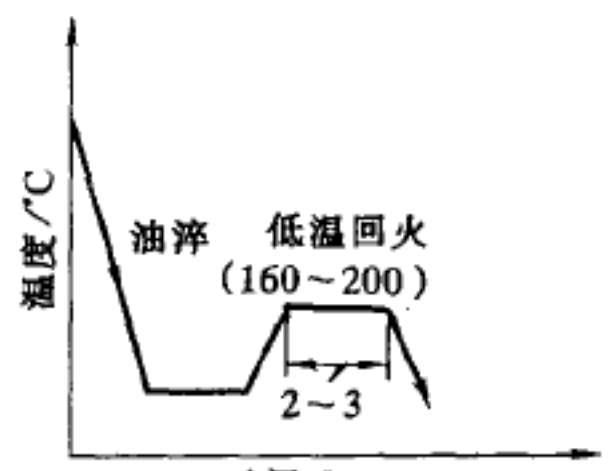
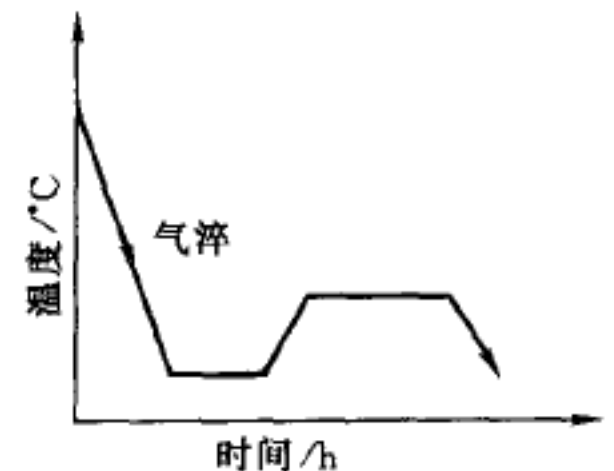
表 12-132 几种钢液体碳氮共渗渗层深度与保温时间的关系

(共渗温度 820 ~ 840℃)

(单位: mm)

钢 号	保 温 时 间 /h					
	1	2	3	4	5	6
20	0.35	0.44	0.54	0.63	0.64	0.74
20Cr	0.39	0.54	0.63	0.74	0.81	0.83
45	0.33	0.36	0.41	0.53	0.56	0.69
45Cr	0.29	0.36	0.49	0.59	0.66	0.69
12CrNi3A	0.35	0.47	0.53	0.59	0.66	0.74

表 12-133 几种碳氮共渗后的热处理工艺及其适用范围

热处理工艺	特点及适用范围	热处理工艺	特点及适用范围
1. 从共渗温度直接水淬, 低温回火 	工艺简单, 是最普遍应用的热处理方式。适用于中、低碳钢或低碳低合金钢。只适宜于液体碳氮共渗或井式炉碳氮共渗。不适于密封箱式炉或连续式作业炉碳氮共渗	3. 从共渗温度直接分级淬火, 空冷, 低温回火 	淬火油可以在 40 ~ 105℃ 的温度范围内使用, 对要求热处理变形小的零件, 可以采用闪点高的油在较高油温内淬火, 对变形要求高的合金钢制零件, 也可以采用盐浴淬火
2. 从共渗温度直接油淬低温回火 	工艺简单, 是最普遍应用的热处理方式。适用于合金钢淬火, 适合于各种炉型进行碳氮共渗后的直接淬火	4. 直接气淬 	细小零件, 采用气淬, 可减少变形, 降低成本, 但应仔细装炉, 以便气淬时气流冷却均匀

(续)

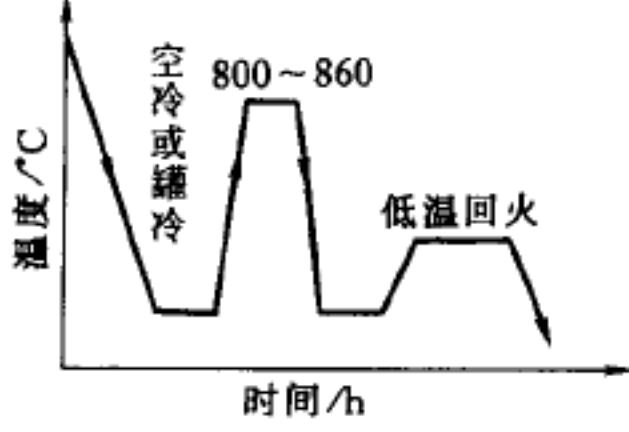
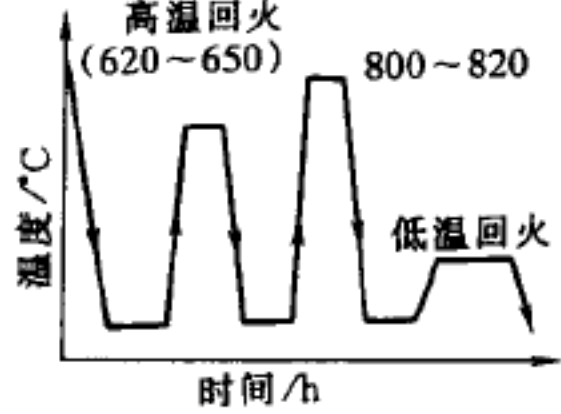
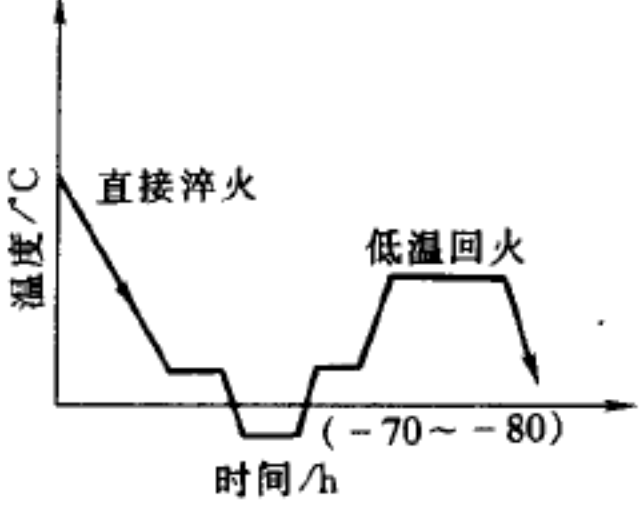
热处理工艺	特点及适用范围	热处理工艺	特点及适用范围
5. 一次加热淬火 	适用于因各种原因不宜直接淬火, 或共渗后尚需机械加工等情况。淬火前的加热应在脱氧良好的盐炉或带保护气氛的加热设备中进行	7. 从共渗温度在空气中或冷却井中冷却, 高温回火、重新加热淬火低温回火 	同上, 共渗后需机械加工者, 也可用高温回火代替冷处理, 以减少残留奥氏体, 高温回火应在生铁屑或保护气氛中进行
6. 从共渗温度直接淬火冷处理 	适用于含 Cr、Ni 较多的合金钢, 如 12CrNi3A、20Cr2Ni4A 及 18Cr2Ni4WA 等。 -70~-80℃ 的冷处理可减少残留奥氏体, 使表面硬度达到技术要求		

表 12-134 20 钢自行车飞轮碳氮共渗、淬火回火工艺参数

工作区域	1 区	2 区	3 区	4 区
工作温度/℃	860	870	870	850
甲醇流量/(L/h)	2.5	2.5	2.5	2.5
氮气流量/(m ³ /h)	2	2	2	2
丙烷流量/(m ³ /h)		0.06~0.6	0.06~0.6	
氨气流量/(m ³ /h)		0.3	0.3	
碳势控制值(%)		1.1	1.05	
氧探头输出值/mV		1143	1137	
淬火油温/℃	90~110			
回火温度及时间/(℃×h)	160×1.5			

表 12-135 15 钢液体碳氮共渗温度和时间对渗层深度的影响

共渗温度/℃	保温时间/min			
	20	60	120	180
	共渗层深度/mm			
810	0.10	0.20	0.30	0.36
830	0.14	0.24	0.34	0.38
850	0.18	0.30	0.38	0.42
870	0.20	0.32	0.40	0.48

表 12-136 回火对于碳氮共渗 1041 钢的夏氏 V 形缺口冲击韧度的影响

试验号	回火温度 /℃	冲击韧度 /J·cm ⁻²	硬 度 HRC ^①								
			距表面距离/mm								
			表面 ^②	心部	0.075	0.15	0.25	0.38	0.64	1.0	1.4
1	淬火态	1.4	60	53	63	64	64	66	61	61	58
2	370	2, 2	47	46	57	57	55	54	49	50	50
3	425	29, 29	42.5	43	57	57	56	55	49	47	47
4	480	69, 60	38	38	54	54	52	50	42	38	38
5	480	47, 52	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	540	78, 81	32	35	49	50	50	47	36	33	32

注：试样在含氮 w_{NH_3} 7% 的气氛中于 845℃ 碳氮共渗 3h，由共渗温度油淬，试样在加工 V 形缺口前镀铜，使缺口暴露于碳氮共渗气氛中。

- ① 由维氏硬度折算的。
② 表面硬度比表面下 0.075mm 的硬度低，是由于残留奥氏体所致。

表 12-137 15CrMn2SiMoA 钢碳氮共渗后的力学性能

热 处 理 制 度	渗层深度/mm	表面硬度 HRC	心部强度 σ_b /MPa	σ_{bb} /MPa	a_K /J·cm ⁻²
880℃ 碳氮共渗 10h，降温到 840℃ 油淬，180℃ 回火	0.80	58 ~ 59	1270 ~ 1390	2550	55

表 12-138 12Cr2Ni4 钢不同氮碳共渗的结果

工艺名称	表面硬度 HV	化合物层厚度/ μm	扩散层厚度/mm
氧 + 氮氮碳共渗	716 ~ 795	8 ~ 15	0.20 ~ 0.30
氮 + 酒精氮碳共渗	752	12 ~ 15	0.20 ~ 0.30

表 12-139 12Cr2Ni4 和 12CrNi3 钢渗碳及碳氮共渗后的力学性能

钢 号	热 处 理	渗层深度 /mm	σ_b /MPa	δ (%)	ψ (%)	a_K /J·cm ⁻²
12CrNi3	假共渗：850℃ × 6h	—	1049	14.8	52.9	135
	假渗碳：900℃ × 3.5h	—	991	19.6	70.4	186
	碳氮共渗 850℃ × 6h	0.64	1515	0.75	—	44
		0.64	1500	1.9	—	11
	碳氮共渗 850℃ × 6h	0.67	1725	2.0	—	42
		0.67	1695	2.0	—	44
	渗碳：900℃ × 3.5h	0.76	1648	2.65	—	41
	渗碳：900℃ × 3.5h	0.71	1507	1.88	—	39
12Cr2Ni4	碳氮共渗	0.66	1745	1.8	—	20
		0.66	1775	1.6	—	23
	碳氮共渗	0.69	1635	1.1	—	19
		0.69	1565	1.45	—	22
	渗碳	0.82	1693	1.58	—	18
	渗碳	0.71	1602	1.9	—	21

表 12-140 35CrMoV 钢碳氮共渗后的热处理规范对冲击疲劳寿命的影响

钢 号	热 处 理 规 范	硬 度 HRC		冲击破断 次数 ^①	冲击破断时间 /min
		表面	心部		
35CrMoV	920 ~ 820℃ 碳氮共渗, 渗层深度 1.5mm	59 ~ 60	48 ~ 49	7260	11
	I: 直接淬火 + 200℃ 回火				
	II: 直接淬火 + 800℃ 盐浴加热 3min 淬火 + 200℃ 回火	61 ~ 62	48 ~ 49	7920	12
	III: 缓冷 + 860℃ 盐浴加热 5min + 200℃ 回火	62 ~ 63	50	34320	52
22CrMnMo	950℃ 固体渗碳, 层深 1.5mm, 缓冷 + 860℃ 盐浴加热 5min 淬火 + 200℃ 回火	61 ~ 63	44 ~ 45	14520	22

① 冲击破断次数及时间是三根试棒的平均值; 冲击能量为 2.7J。

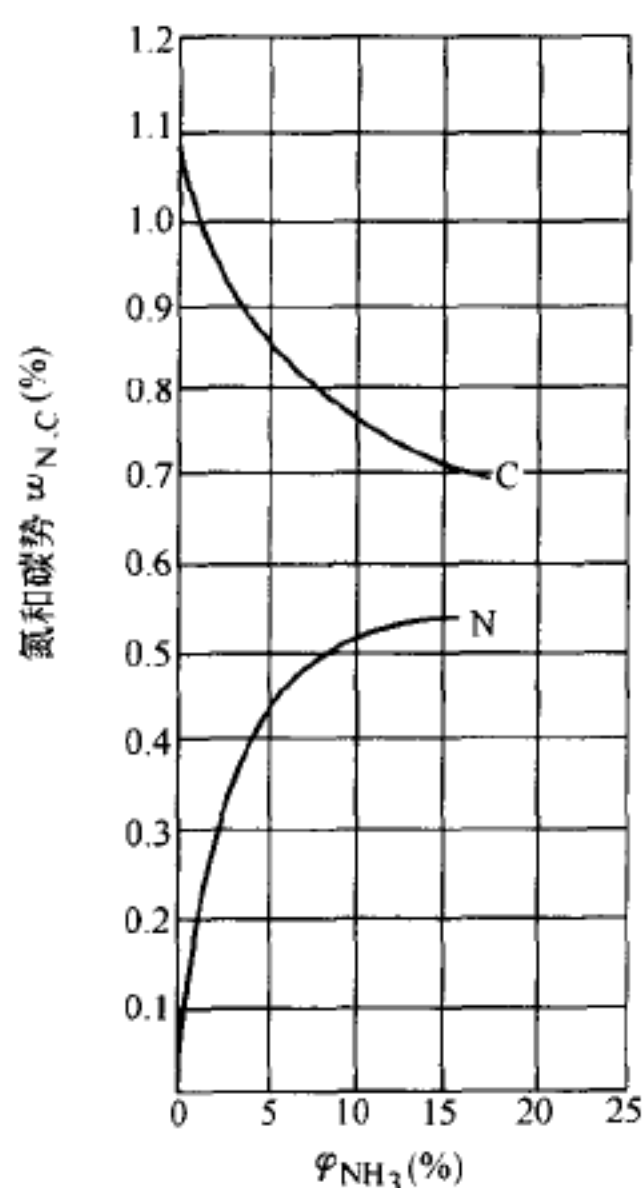


图 12-129 氮加入量对炉气内碳势、氮势的影响

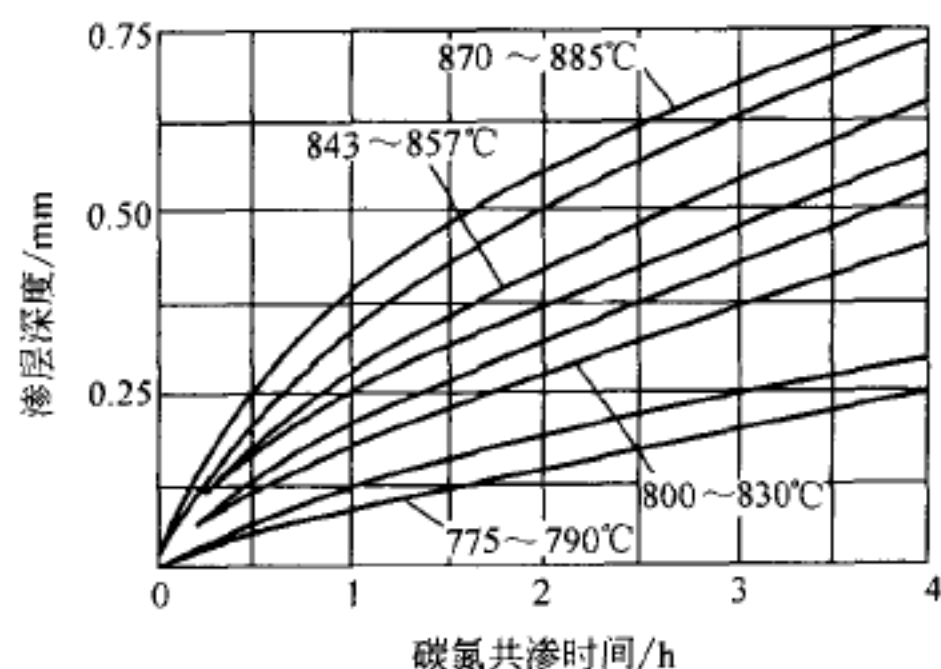


图 12-130 碳氮共渗温度、时间对碳氮共渗层深度的影响

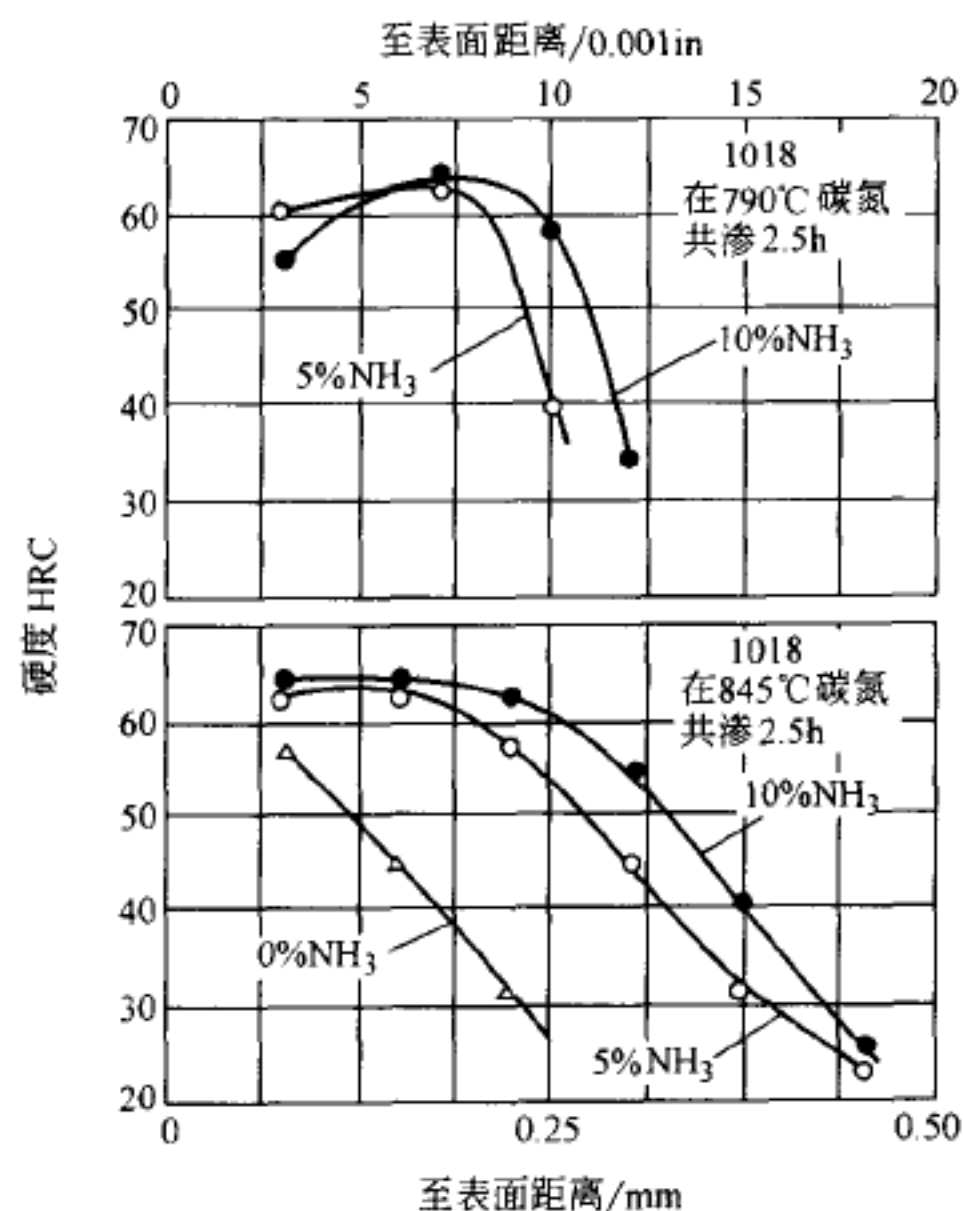


图 12-131 碳氮共渗气体中的氮量对硬度梯度的影响

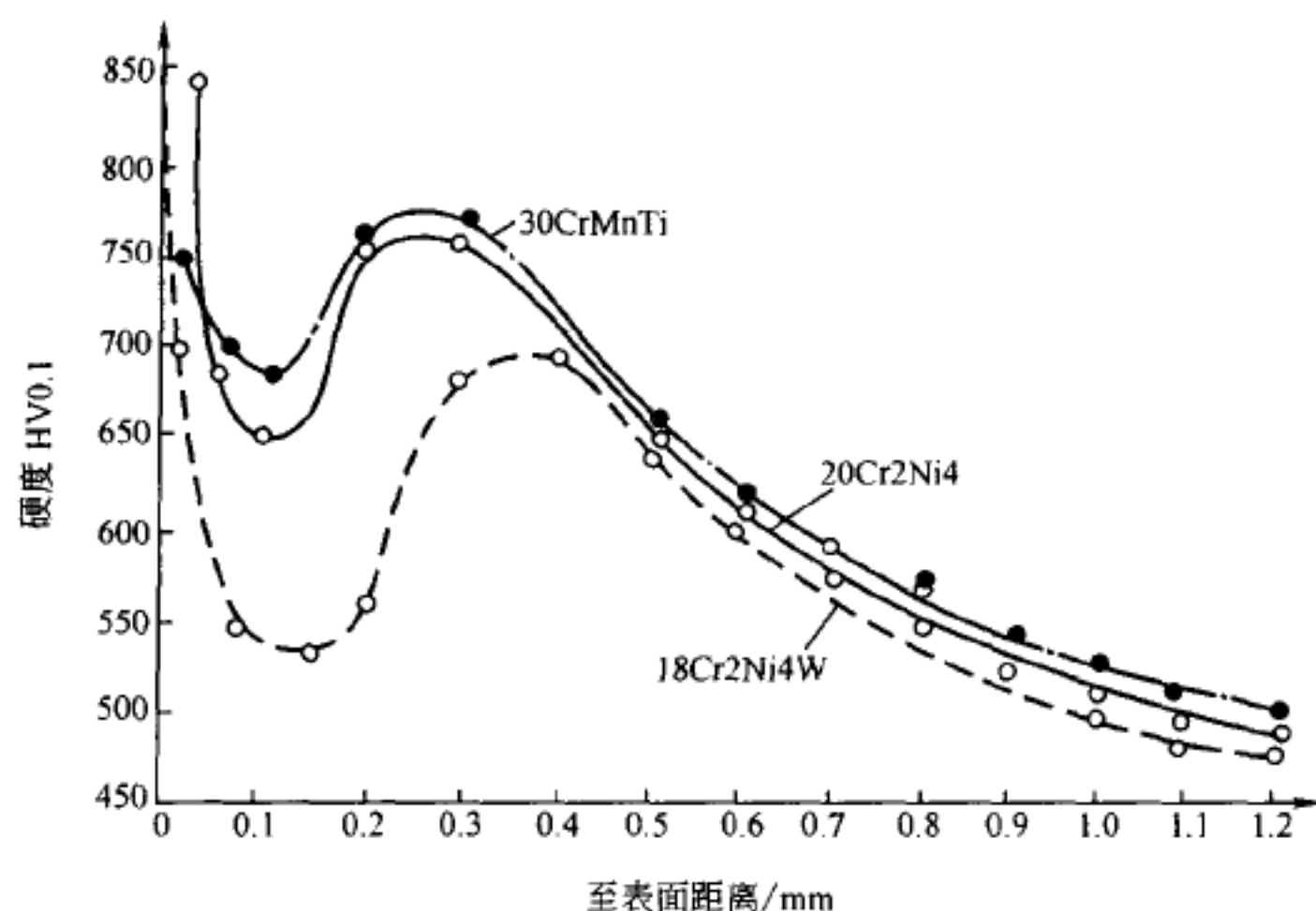
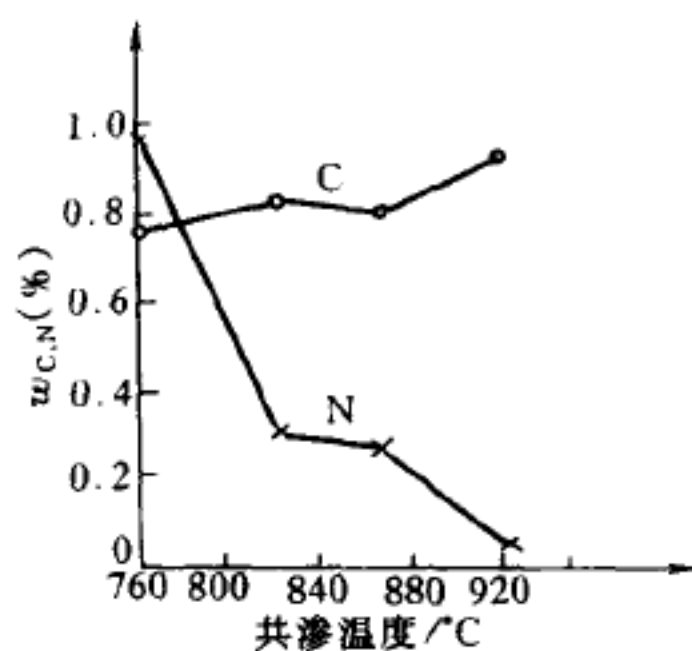
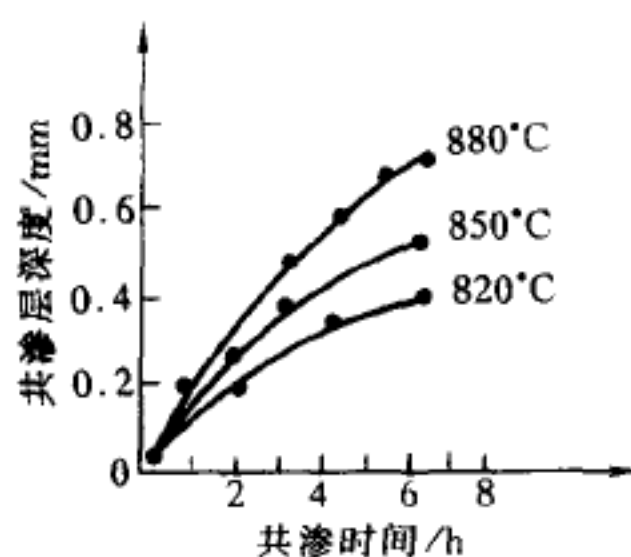
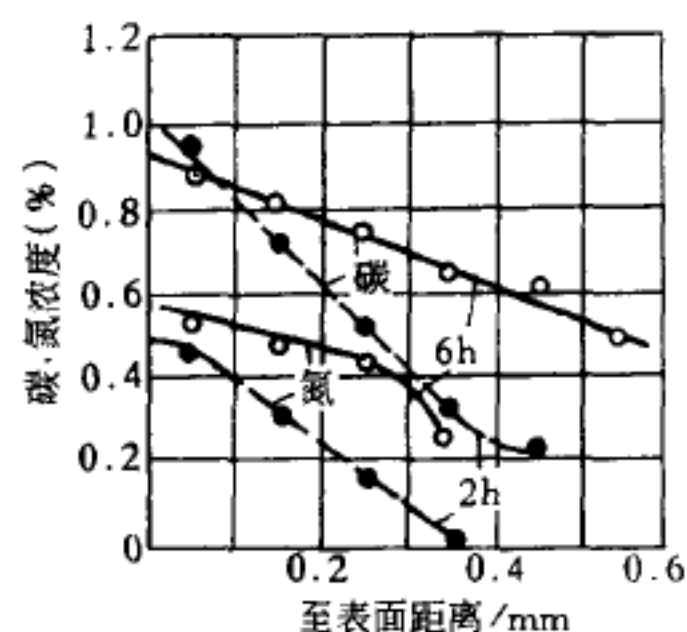
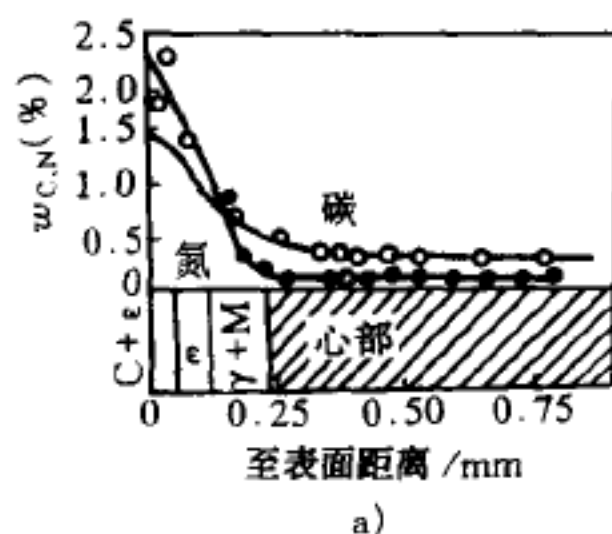
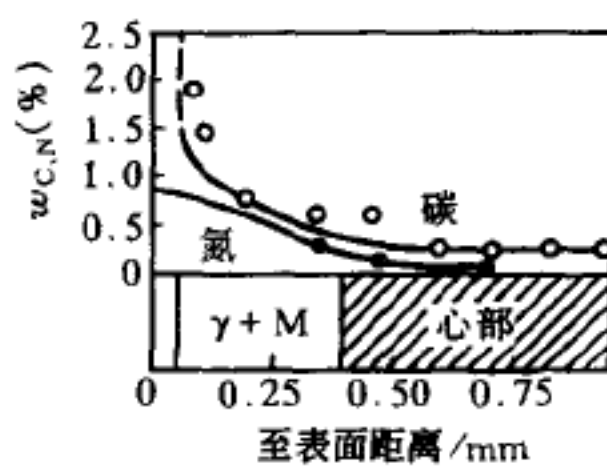


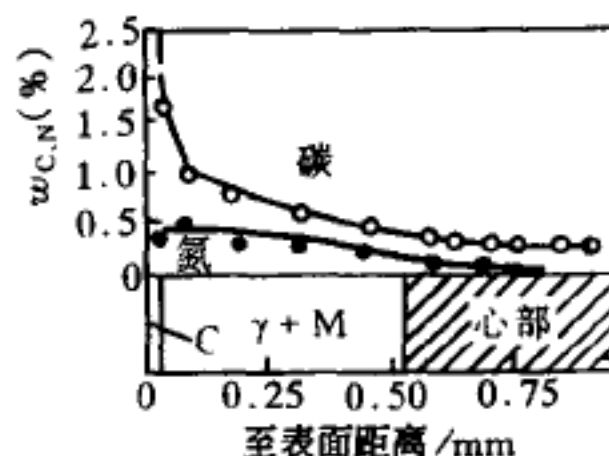
图 12-132 三种钢 850℃ 碳氮共渗后直接淬火的渗层硬度分布曲线

图 12-133 10 钢碳氮共渗温度对表面碳、氮含量的影响
(共渗介质: 煤油 + 氮; 共渗时间: 1.5h)图 12-134 20 钢碳氮共渗温度和时间对渗层深度的影响
(共渗介质: 煤油 + 氮)图 12-135 20 钢碳氮共渗时间对碳氮浓度梯度的影响
(850℃, w_{NH_3} 35%)

a)



b)



c)

图 12-136 20 钢不同温度碳氮共渗后渗层碳氮含量及油淬后的组织

(共渗介质: NH_3 40% + CH_4 10% + 保护气 50%)C— Fe_3C ; e— $Fe_3(C, N)$; γ—奥氏体; M—马氏体

a) 705℃ × 4h b) 760℃ × 4h c) 815℃ × 4h

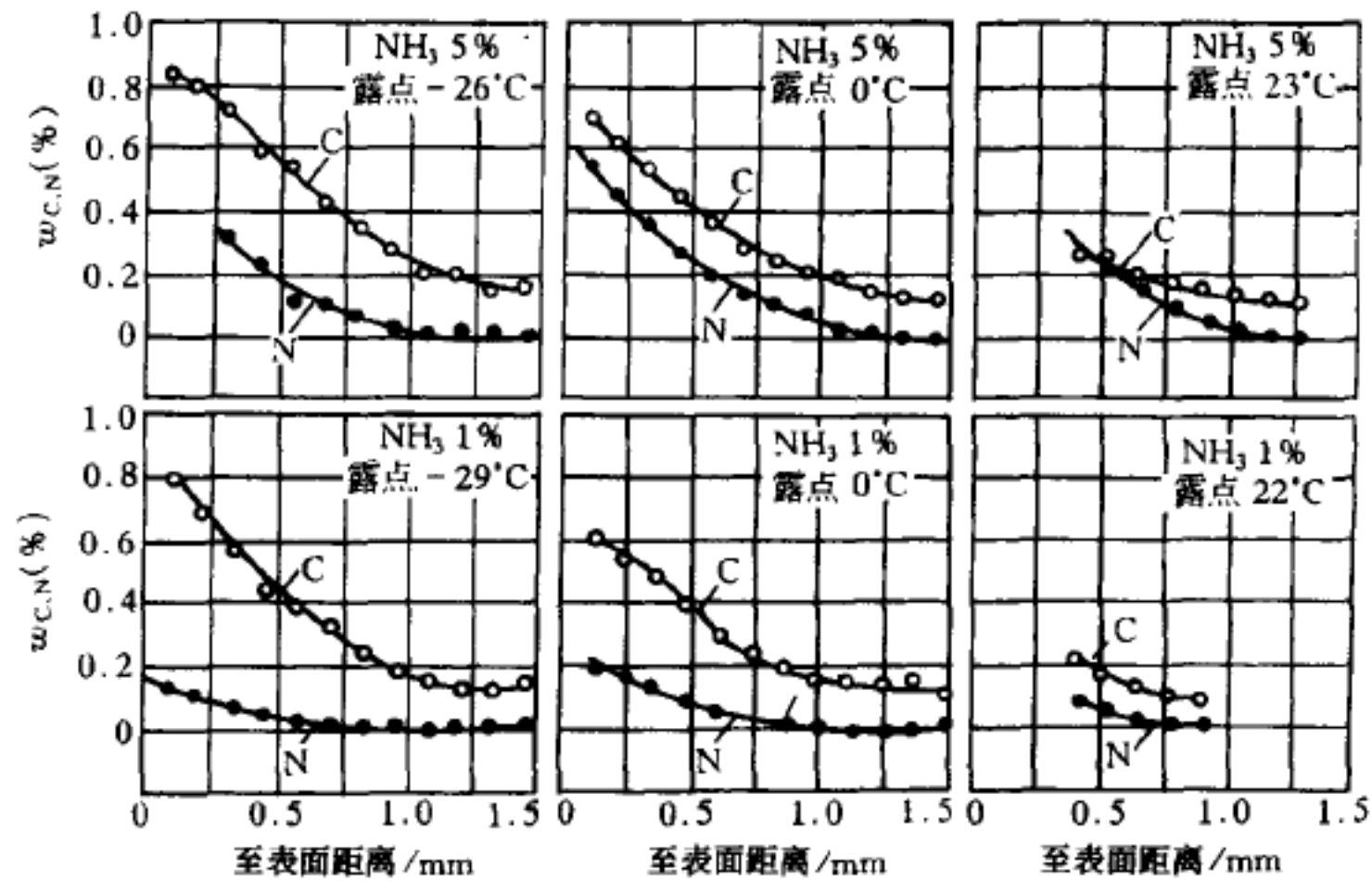


图 12-137 20 钢碳氮共渗时的氨浓度和富化气露点对碳氮梯度的影响
(840℃ × 4h 富化气含 CH₄5%, 其余为载体气)

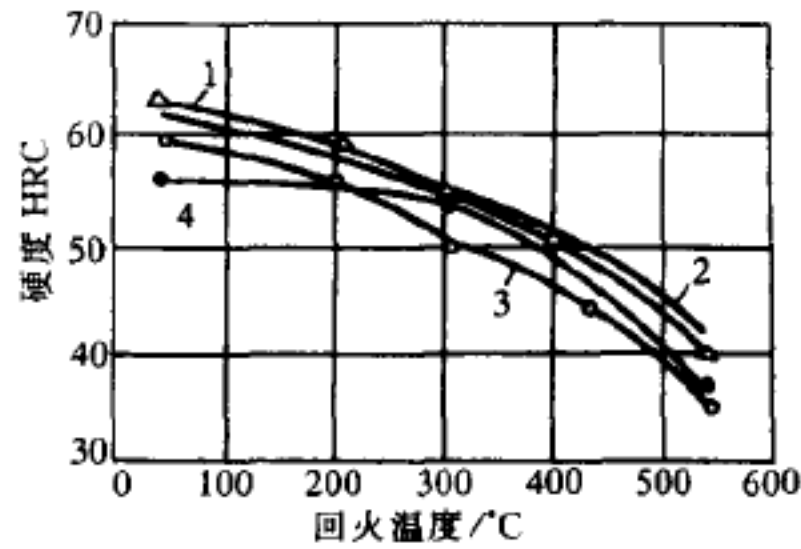


图 12-138 20 钢在不同氨气比例的气氛中碳氮共渗试样回火曲线
1—845℃, NH₃5% 2—845℃, NH₃10% 3—790℃, NH₃5% 4—790℃, NH₃10%
(全部试样均共渗 2.5h)

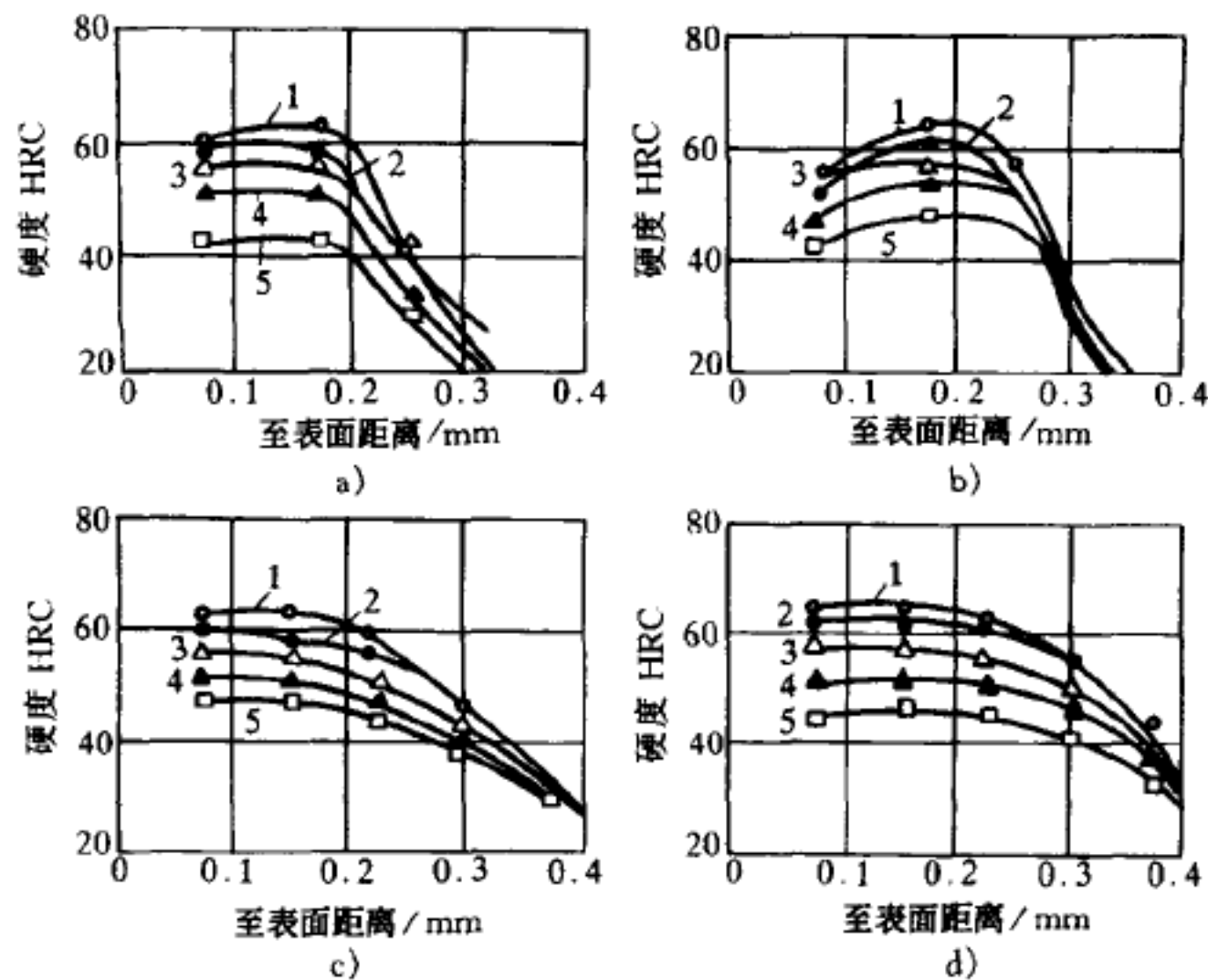


图 12-139 回火对 20 钢碳氮共渗试样渗层硬度分布曲线的影响

a) NH₃5%, 780℃, 2.5h b) NH₃10%, 780℃, 2.5h

c) NH₃5%, 845℃, 2.5h d) NH₃10%, 845℃, 2.5h

1—淬火态 2—205℃回火 3—315℃回火 4—425℃回火 5—540℃回火均回火 1h

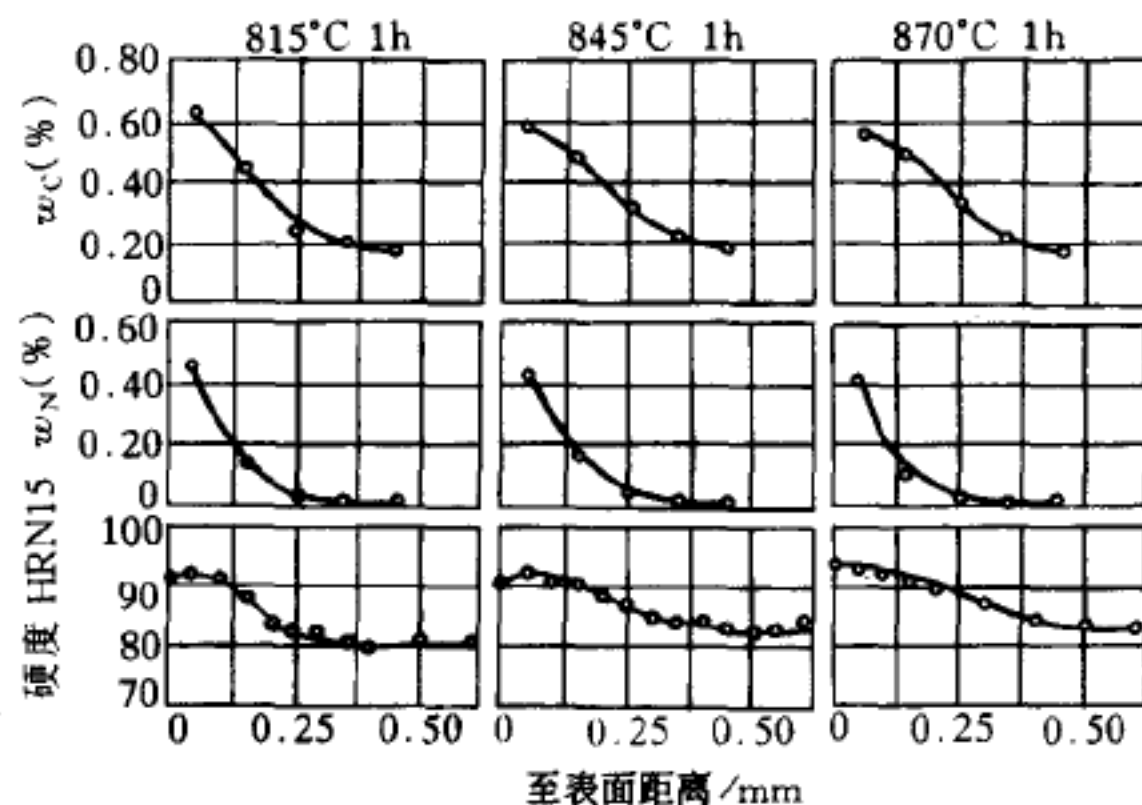


图 12-140 20Mn 钢在含 NaCN30% 碳氮共渗盐浴中不同温度下共渗 1h 并淬火后的碳、氮浓度及硬度分布

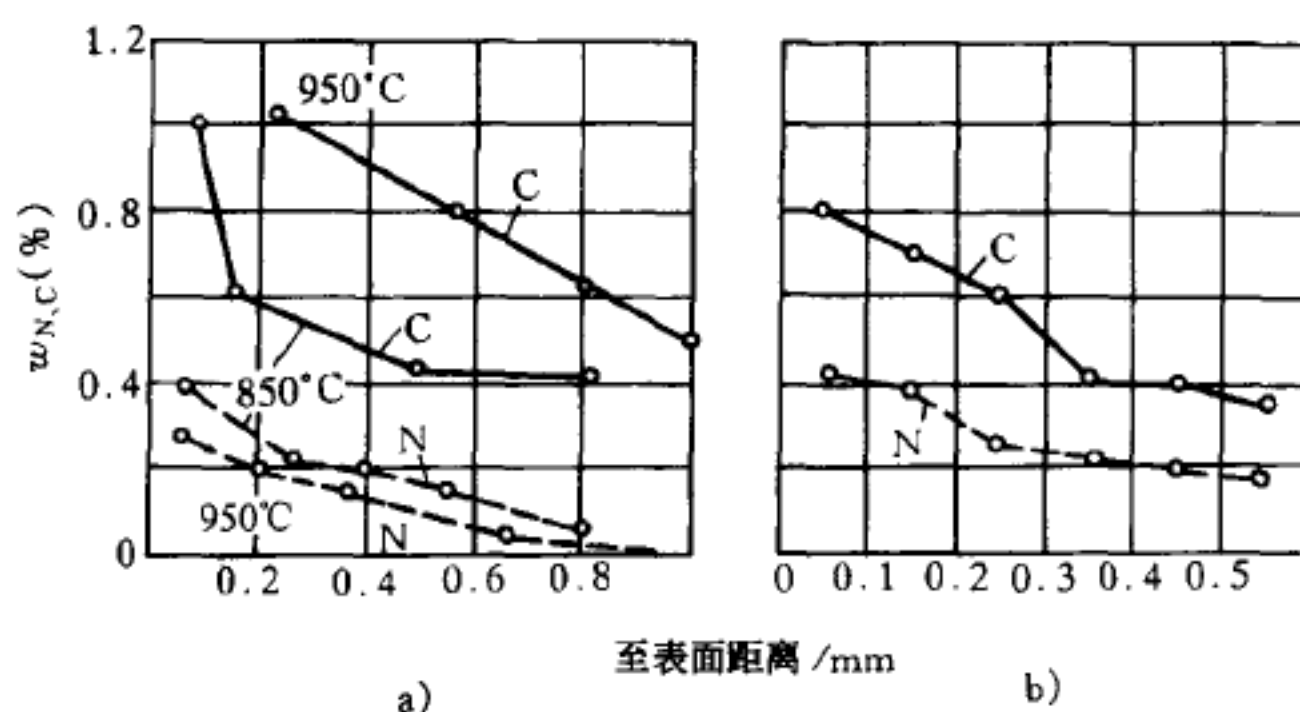


图 12-141 用三乙醇胺碳氮共渗渗层中碳、氮的含量
a) 40 钢, 加热 40min, 保温 5h b) 18CrMnTi 加热 1.5h, 850°C 保温 1.5h

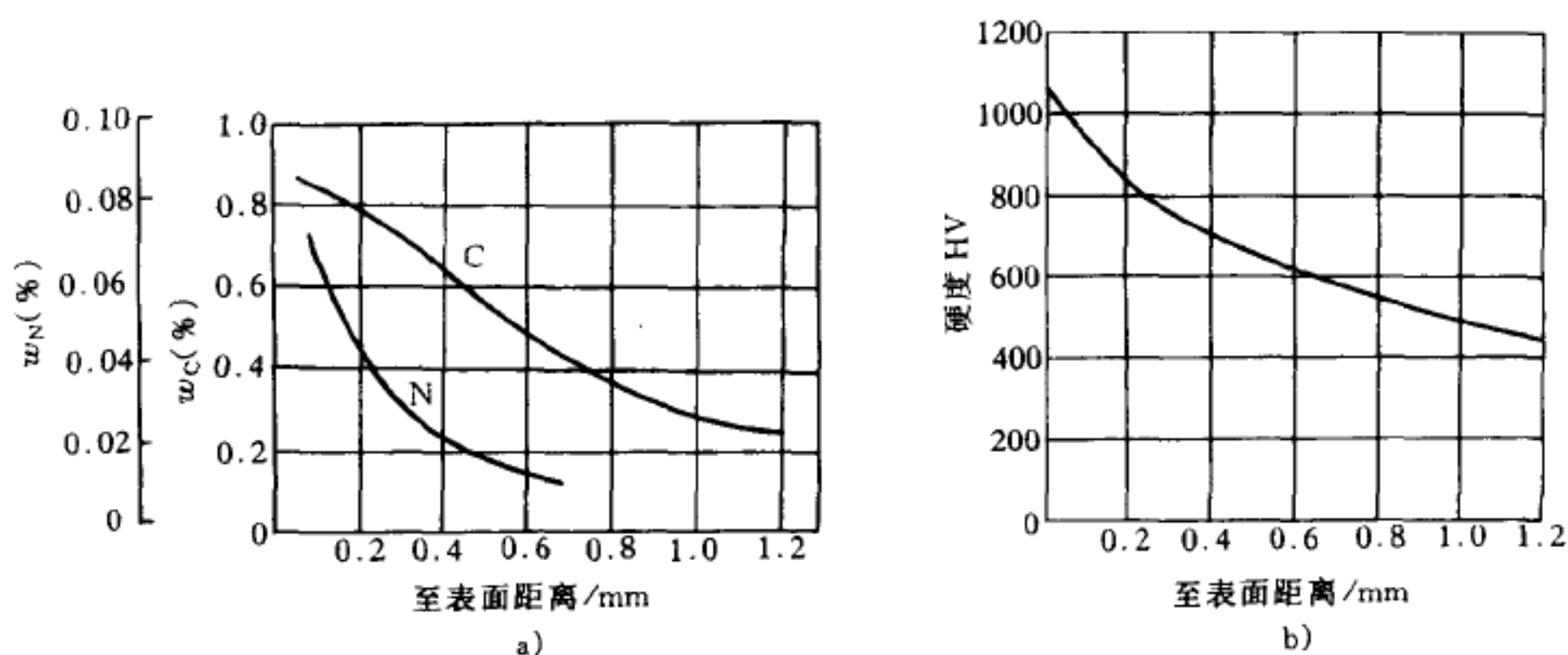


图 12-142 25MnTiB 钢盐浴渗碳后渗层中碳和氮浓度分布 a) 及渗层硬度变化 b) 曲线
(920°C 渗碳 4h30min, 重新加热到 830°C 保温 20min, 在 250°C 碱浴中淬火, 180°C 回火 150min 空冷; 盐浴成分中含 $w_{CN} 0.7\% \sim 1.2\%$)

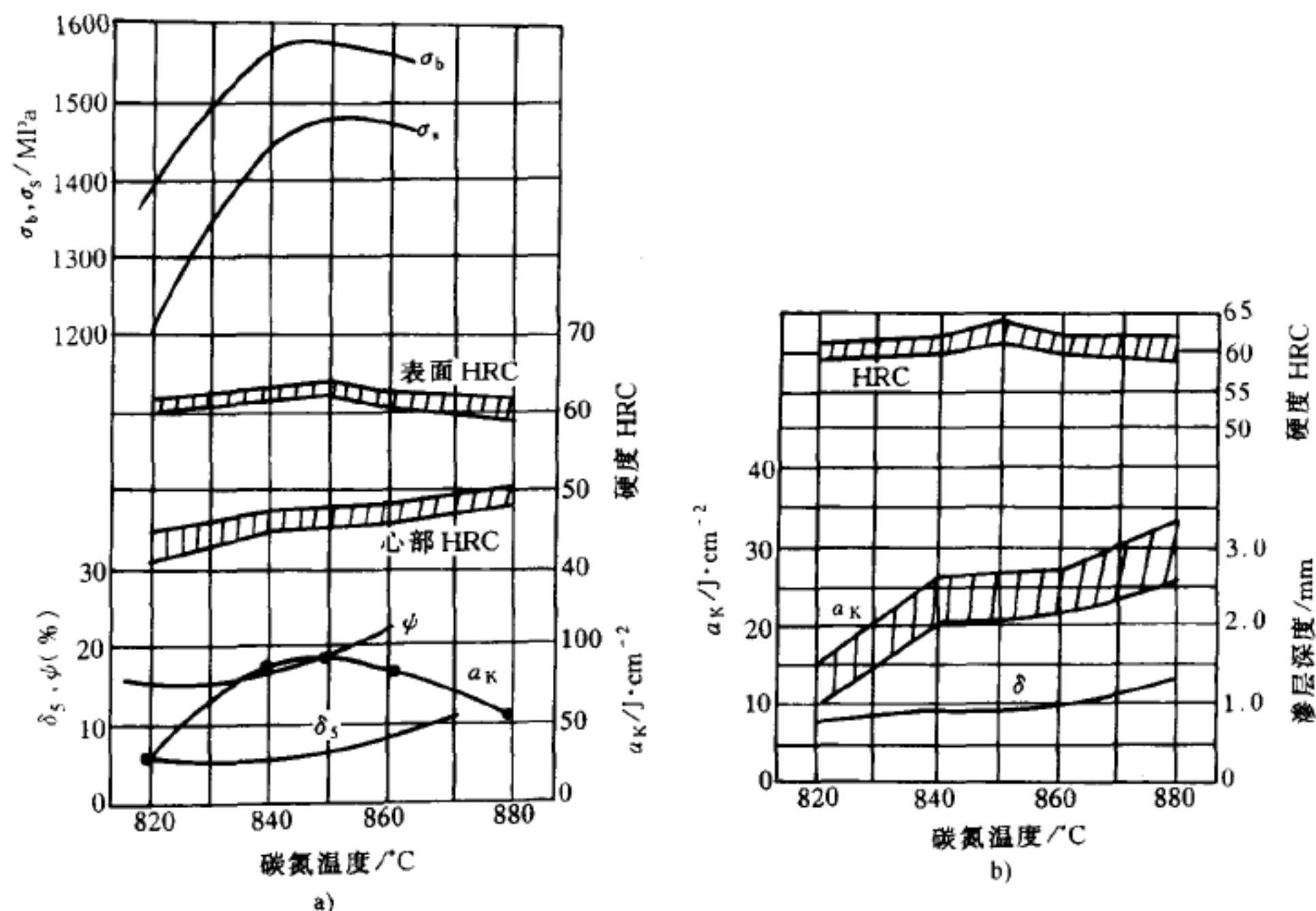


图 12-143 24SiMnMoVA 钢不同温度碳氮共渗之后的力学性能

(用钢成分 (质量分数) (%): C0.20, Si0.59, Mn1.32, Mo0.45, V0.17, S0.006, P0.013, Ni0.05, Cr0.11;

碳氮共渗工艺: RJJ-105-9T 型渗碳炉, 升温排气期—氮 16L/min, 煤油 40 滴/min (100 滴 = 3.5mL),

碳氮共渗期—氮 6L/min, 煤油 140 滴/min, 碳氮共渗 9h, 油淬, 160℃回火空冷;

图 b 中冲击韧度为无缺口试样测得结果)

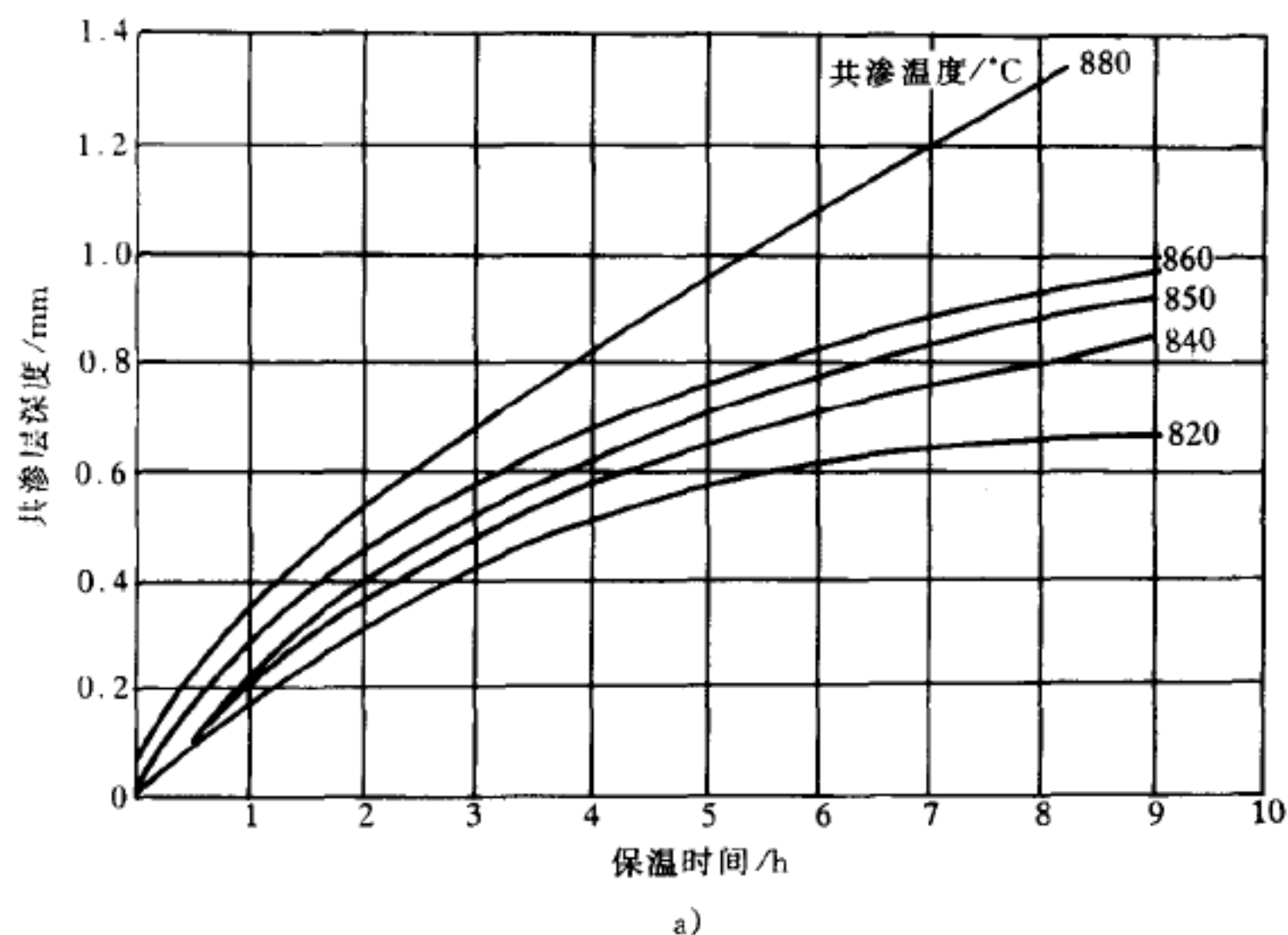


图 12-144 不同温度盐浴碳氮共渗时共渗速度 a) 碳、氮浓度分布 b) 及共渗层硬度 c)

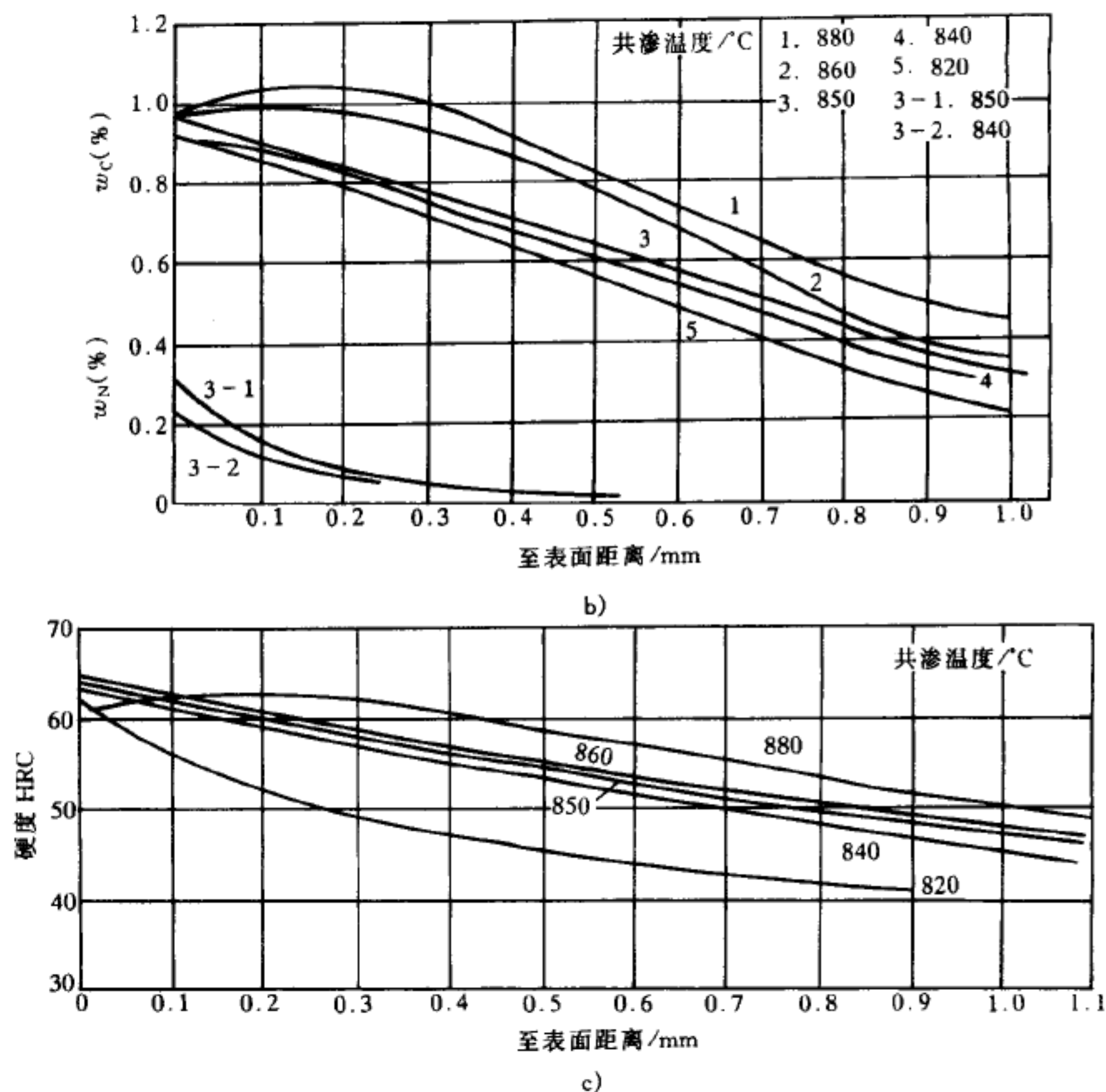


图 12-144 (续)

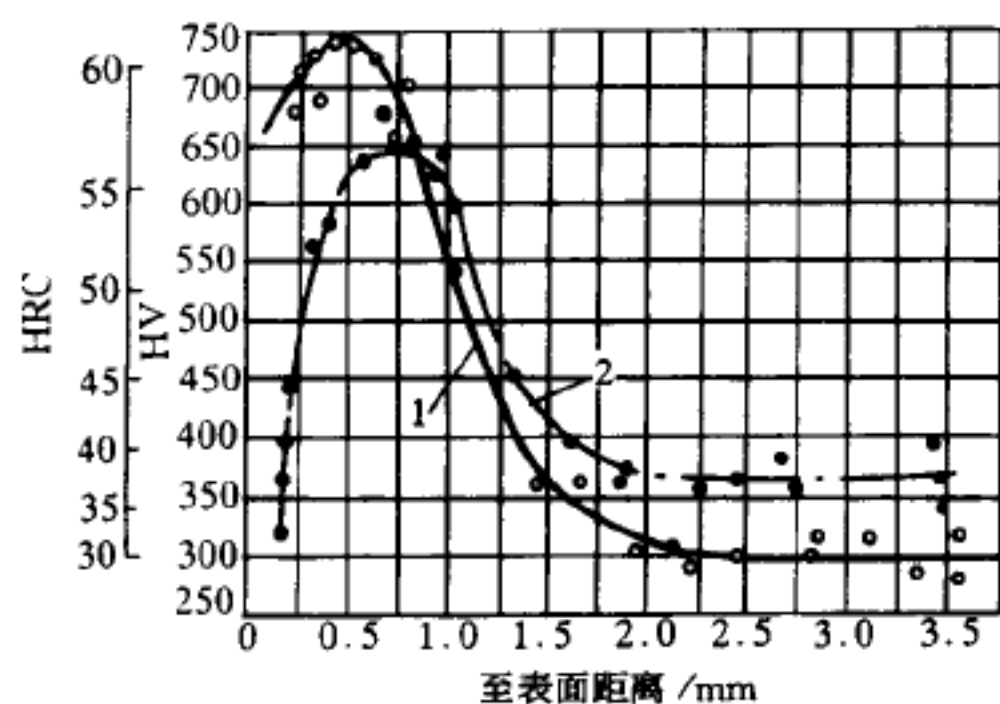


图 12-145 20CrMn (20MnCr5) 和 20CrMo (20MoCr4) 钢碳氮共渗后的硬度分布
($920^{\circ}\text{C} \times 5\text{h}$ 碳氮共渗后油淬, $200^{\circ}\text{C} \times 2.5\text{h}$ 回火)
1—20CrMo 2—20CrMn

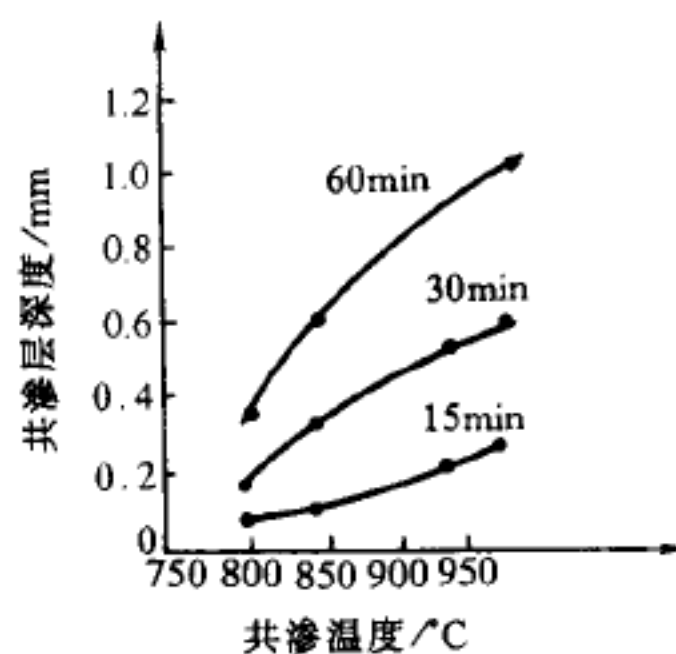


图 12-146 20CrMnTi 钢离子碳氮共渗温度对渗层深度的影响
(氮气 380L/h 酒精蒸气 150L/h)

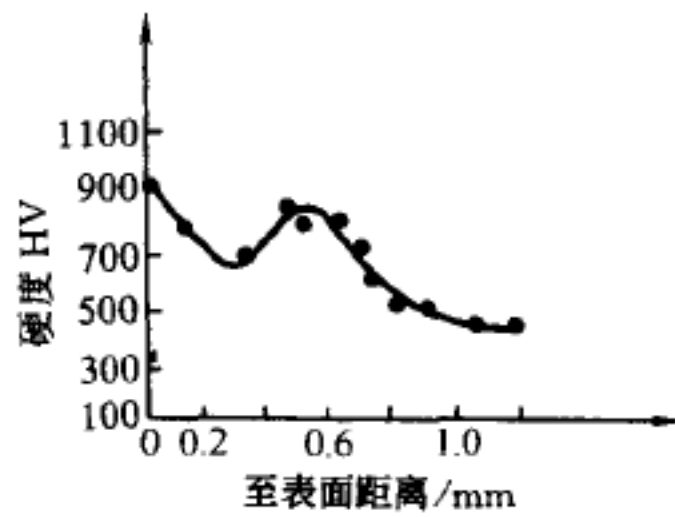


图 12-147 20CrMnTi 钢离子碳氮共渗后的硬度分布
(850℃共渗 1h)

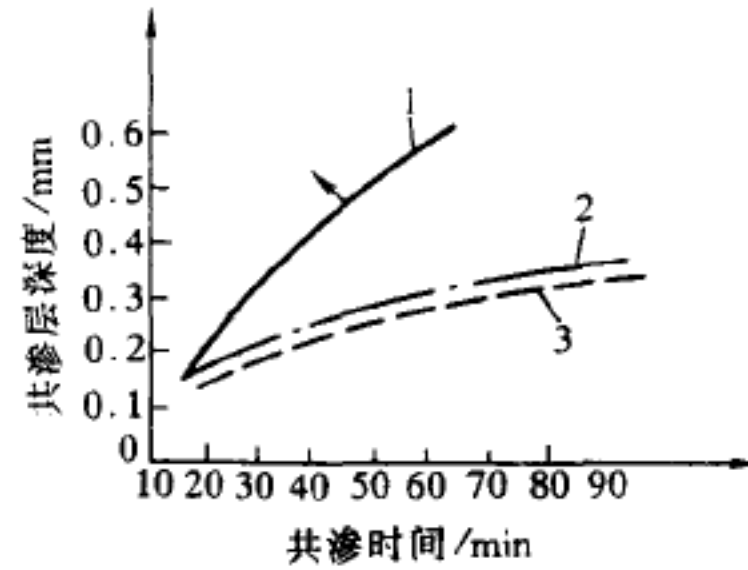


图 12-148 20CrMnTi、20Cr、20 钢离子碳氮共渗时间对渗层深度的影响
(840℃共渗, 氮气 380L/h, 酒精蒸气 150L/h)
1—20CrMnTi 2—20Cr 3—20 钢

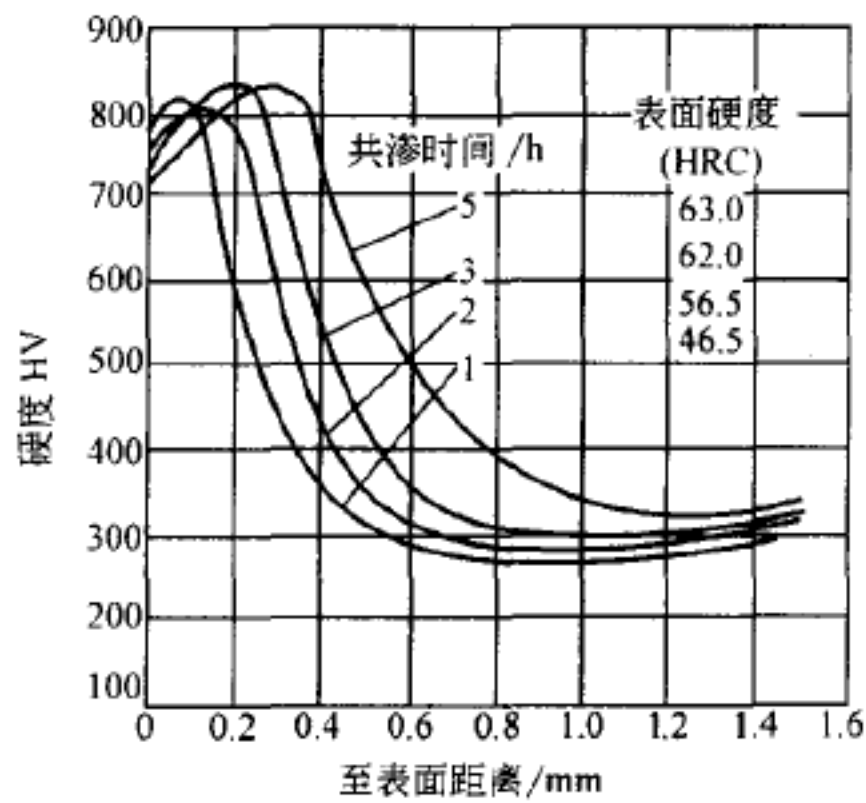


图 12-149 12CrNi3 (BS655M13, En36A) 钢 870℃液体碳氮共渗不同时间并淬火后的硬度分布 (未回火)

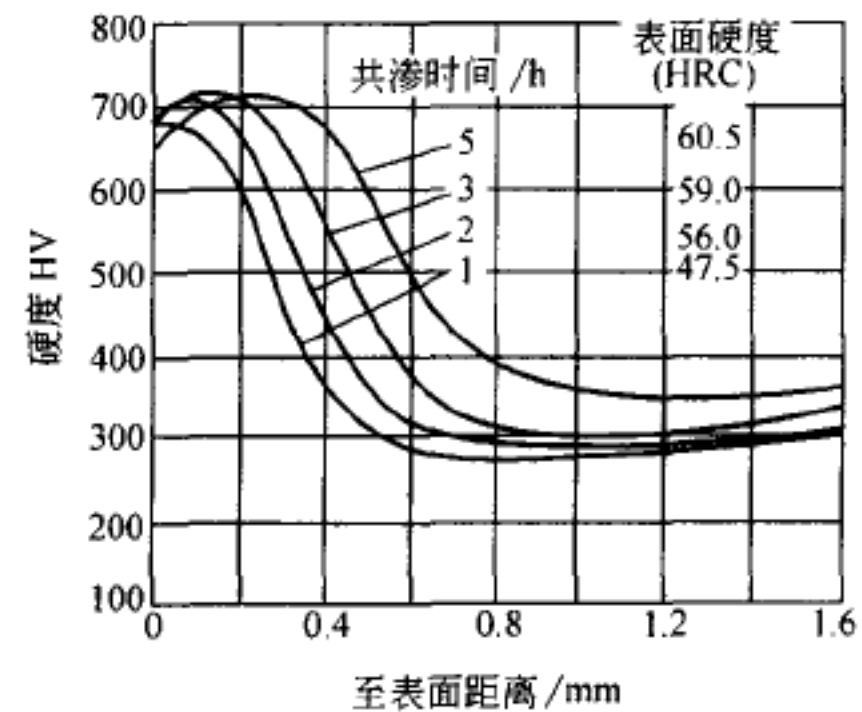


图 12-150 12CrNi3 (BS655M13, En36A) 钢液体碳氮共渗 (870℃) 不同时间并淬火后的硬度分布 (180℃回火 0.5h)

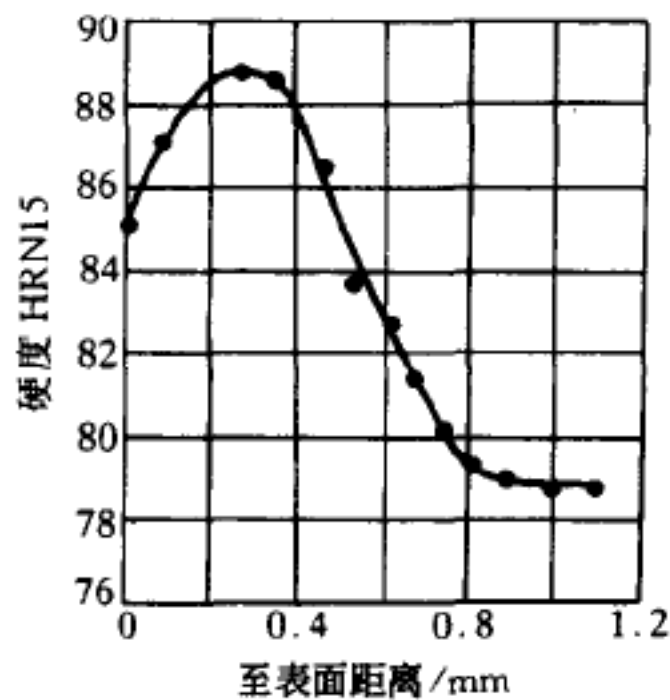


图 12-151 12Cr2Ni4A 钢经碳氮共渗及淬火后 (未经冷处理) 的硬度分布曲线
(工艺: 氮气 + 煤油, 840℃, 6h)

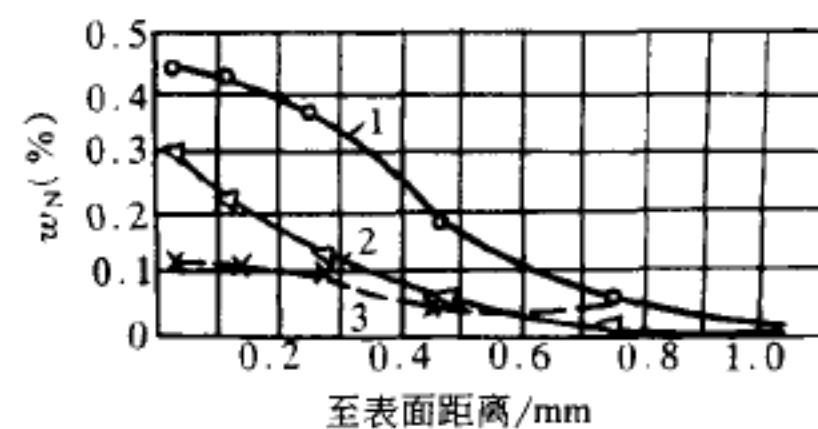


图 12-152 20Cr2Ni4 钢不同温度碳氮共渗后的氮浓度分布
1—780℃ 2—820℃ 3—860℃
(设备: RJJ—105—9T; 氮气用量: 升温, 0.7m³/h, 保温, 0.2m³/h; 煤油: 10mL/min; 时间: 8h)

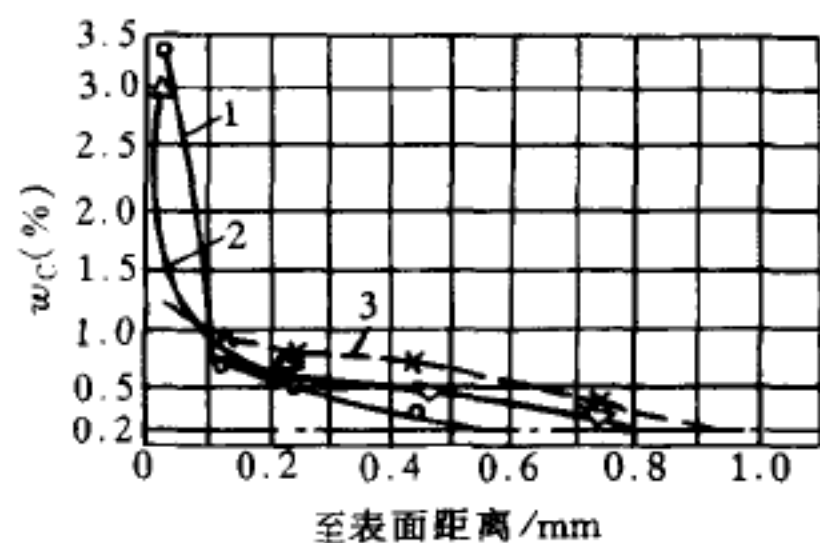


图 12-153 20Cr2Ni4 钢不同温度碳氮共渗后的碳浓度分布 (条件同图 12-152)
1—780°C 2—820°C 3—860°C

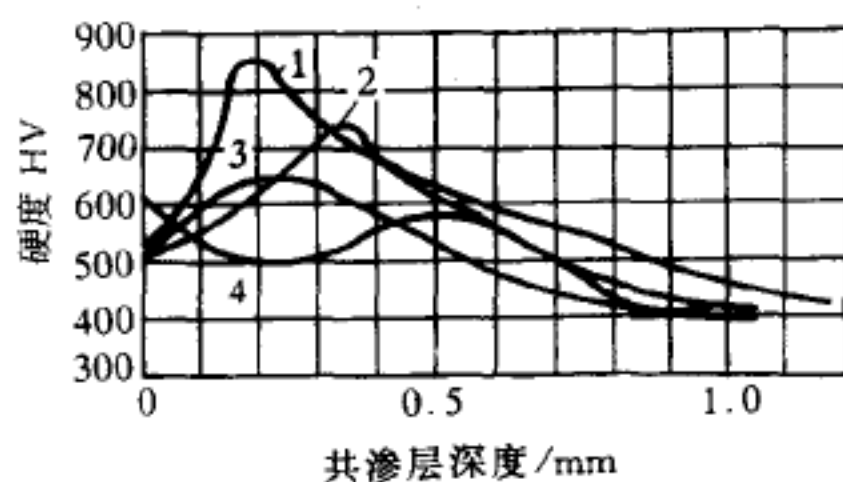


图 12-155 20Cr2Ni4 钢碳氮共渗后经不同温度淬火后的硬度分布
1—760°C 2—800°C 3—840°C 4—880°C
(均在盐浴炉中加热; 淬火后经 160°C 回火)

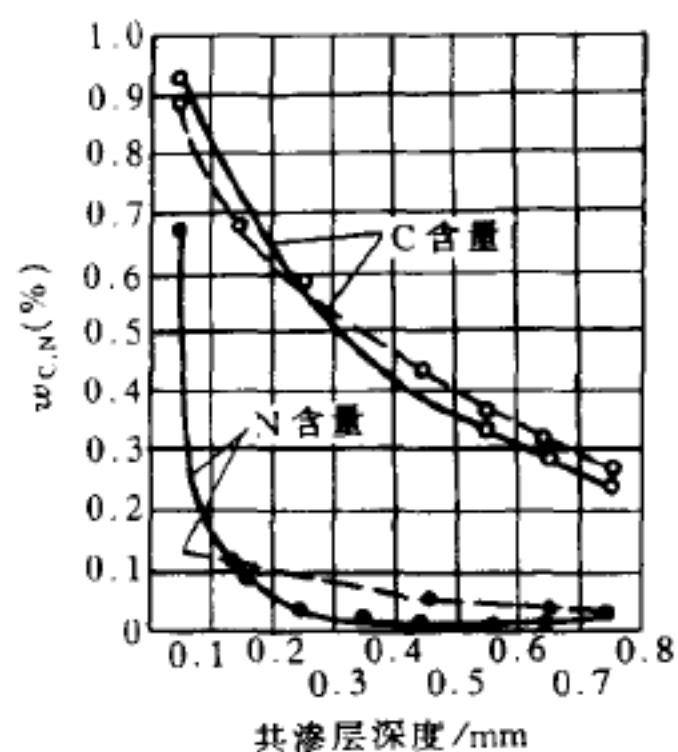


图 12-154 20Cr2Ni4 钢碳氮共渗和复合处理后的碳氮浓度分布
(设备: RJJ—75—9T; 煤油滴量: 4~6mL/min; 氨气量: 10~12L/min; 920°C × 4h 共渗。)
虚线为 920°C 碳氮共渗 实线为 920°C 碳氮共渗后氮碳共渗

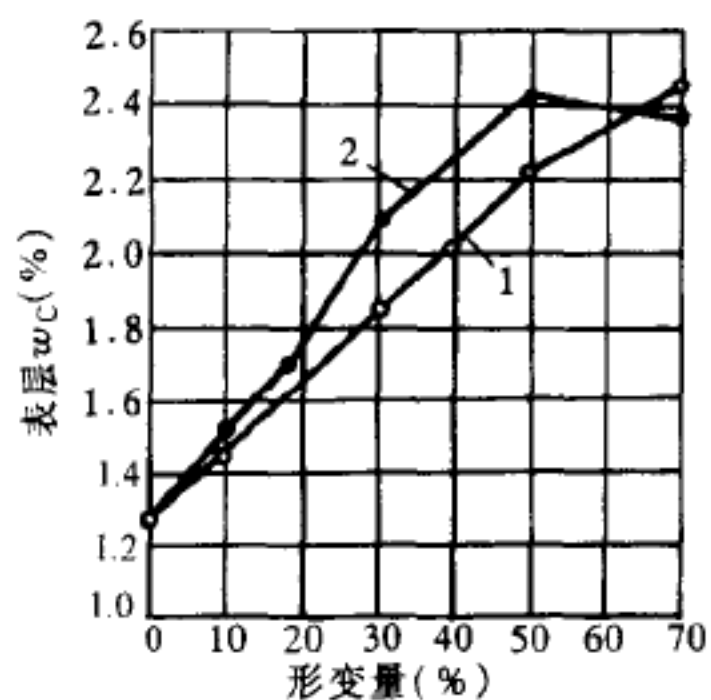


图 12-156 18Cr2Ni4W 钢碳氮共渗后表面碳浓度与室温形变量的关系
1—5h 共渗 2—7h 共渗

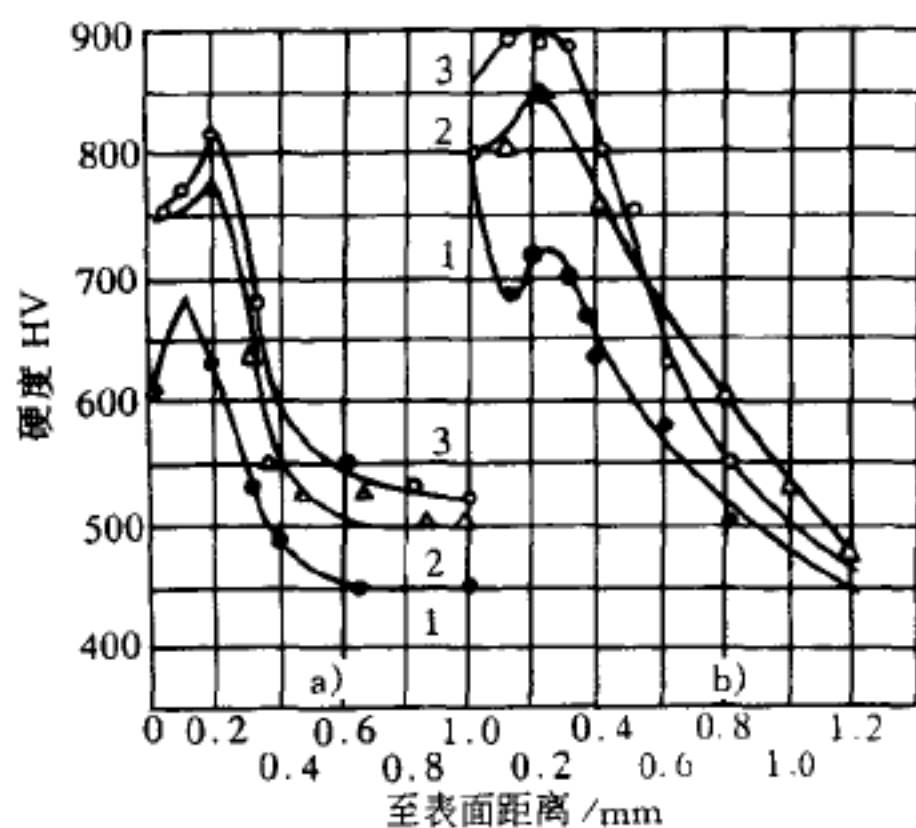


图 12-157 18Cr2Ni4W 钢碳氮共渗后显微硬度分布与室温变形量的关系
a) 共渗 5h b) 共渗 7h
1—未形变 2—形变 30% 3—形变 50%

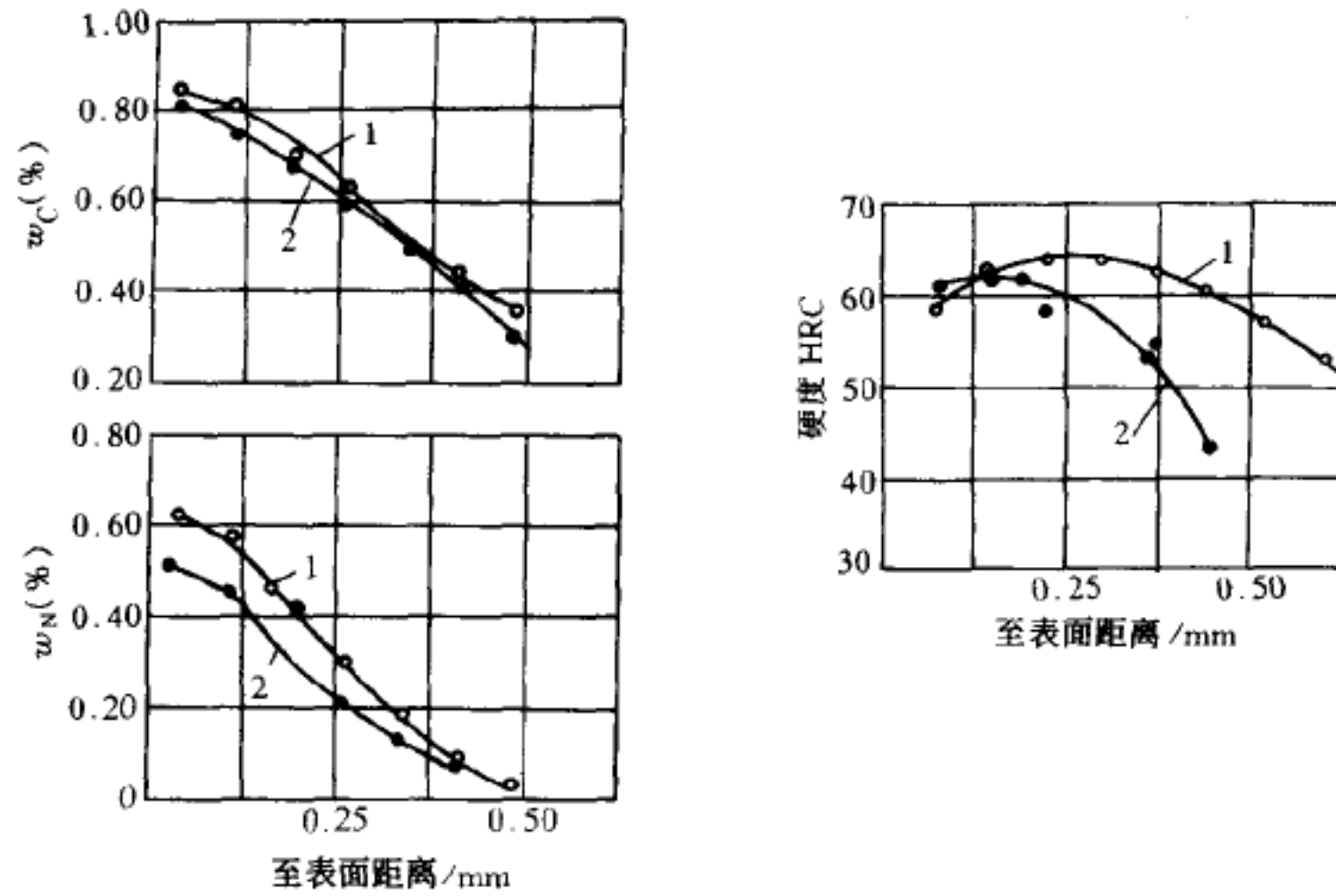


图 12-158 18Mn 及 20CrNiMo 钢碳氮共渗层中的碳、氮浓度及硬度分布
(共渗温度: 845℃; 共渗时间: 4h; 共渗后淬入 55℃ 油中;
共渗气体介质为吸热式载体气, NH_3 5%, C_3H_8 0.05% ~ 0.15%,
 CO 0.32% ~ 0.34%, 露点为 -7 ~ -6℃)

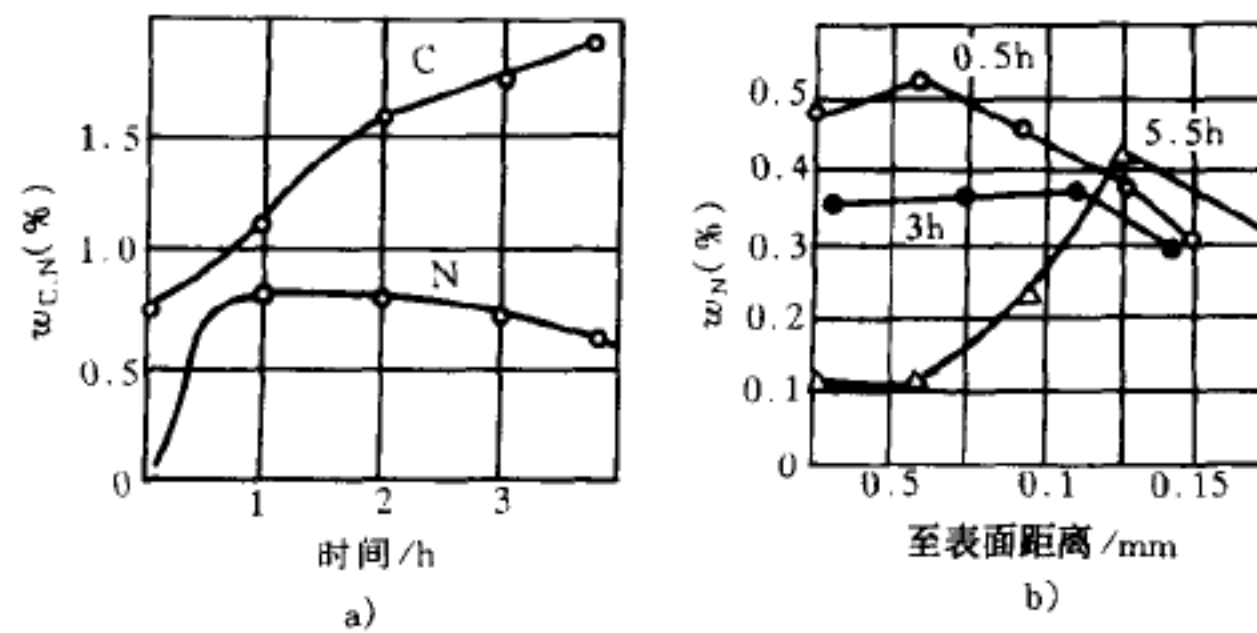


图 12-159 碳氮共渗保温时间对渗层浓度的影响

a) T8 钢片在苯和氮混合物中 800℃ 碳氮共渗
不同时间表面 C、N 浓度 b) 30CrMnTi 钢在三乙醇胺
气体中, 850℃ 共渗不同时间渗层中氮浓度分布

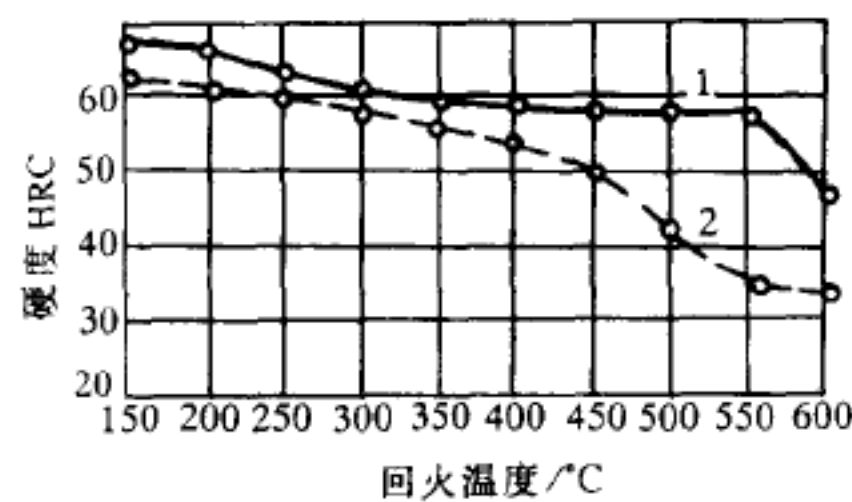


图 12-160 GCr15 钢碳氮共渗对硬度的影响

1—碳氮共渗: 温度 820 ~ 830℃, 保温 1.5 ~ 3h, 30 ~ 60℃ 油淬, -60 ~ -70℃
冷处理, 150 ~ 160℃ 回火 2—一般热处理: 840 ~ 860℃ 油淬, -50 ~ -70℃
冷处理, 150 ~ 160℃ 回火

12.5 渗硼工艺及性能 (表 12-141 ~ 表 12-166 和图 12-161 ~ 图 12-166)

表 12-141 渗硼在模具上的应用及其效果

模具名称	被加工零件	模具材料及工艺	使用寿命	效 果
冷拔模外模	$\phi 56\text{mm} \times 2 \sim 4\text{mm}$ 30CrMnSiA 无缝管	45 钢, 碳氮共渗	400mm/模	提高寿命近 3 倍
		45 钢, 渗硼	1500mm/模	
冷锻模凹模	M8 六角螺母	Cr12MoV, 淬火、回火	2 ~ 3 万件	提高寿命 6 倍
		Cr12MoV, 渗硼	14 ~ 22 万件	
螺母冲孔顶头	M6 螺栓	65Mn, 淬火、回火	0.3 ~ 0.4 万件	提高 4 倍
		65Mn, 渗硼	2 万件	
热冲压模	六角螺母	3Cr2W8V, 碳氮共渗	1 万件	提高 5 倍
		3Cr2W8V, 渗硼	6 万件	
挤压模	偏心螺杆	Cr12MoV, 淬火、回火	0.1 ~ 0.15 万件	提高 1 ~ 2 倍
		T10 钢, 渗硼	> 0.32 万件	

表 12-142 几种气体渗硼剂与工艺

渗 硼 剂	处理工艺		渗硼层厚度 /mm	备 注
	温度 /℃	时间 /h		
$\text{B}_2\text{H}_6 : \text{H}_2 = 1 : 25 \sim 75$	850	扩散 2 ~ 3 2 ~ 4		B_2H_6 有剧毒, 价格昂贵
$\text{BCl}_3 : \text{H}_2 = 5 \sim 10 : 100$	750 ~ 950	3 ~ 6	纯铁 0.1 ~ 0.3	BCl_3 易堵塞和腐蚀管道
$\text{BCl}_3 : \text{H}_2 = 5 \sim 10 : 100\text{N}_2$				开始通 N_2 排气与保护冷却

注: 在流态床中渗硼。

表 12-143 不同材料的离子渗硼层厚度

(单位: μm)

渗硼工艺	20 钢	45 钢	40Cr	硼铸铁
700℃, 2h	40	35	32	28
700℃, 4h	55	51	48	44
700℃, 6h	64	61.5	57	53

表 12-144 液体渗硼盐浴配方及工艺

盐浴成分 (质量分数) (%)	处 理 工 艺		渗层厚度 / μm	备 注
	温度/℃	时间/h		
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 70 \sim 80$, $\text{SiC} 20 \sim 30$	900 ~ 950	5	70 ~ 100 (45 钢)	单相 Fe_2B , 但工件较难清洗
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 80$, $\text{SiC} 13$, $\text{Na}_2\text{CO}_3 3.5$, $\text{KCl} 3.5$	950	3	120 (20 钢)	Fe_2B

(续)

盐浴成分 (质量分数) (%)	处 理 工 艺		渗层厚度 / μm	备 注
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/h		
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 80, 铝粉 10, NaF 10	950	6	200 (45 钢)	$\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 60, NaCl 15, Na_2CO_3 15, Si-Fe 10	900 ~ 950	3	120 ~ 140 (45 钢)	Fe_2B , 工件较易清洗
NaCl 80, NaBF_4 15, B_4C 5	950	5	200	中性盐为基

表 12-145 几种粉末渗硼剂配方及工艺

渗剂成分 (质量分数) (%)	处 理 工 艺		渗层厚度 / μm	备 注
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/h		
硼铁 72, KBF_4 6, NH_4HCO_3 2, 木炭 20	850	4	140	45 钢
硼铁 20, KBF_4 5, NH_4HCO_3 5, Al_2O_3 70	850	4	85	45 钢
硼铁 5, KBF_4 7, 活性炭 2, 木炭 8, SiC 78	900	5	95	45 钢
B_4C 5, KBF_4 5, 活性炭 2, SiC 88	900	4	104	45 钢、T10 钢
B_4C 5, KBF_4 5, 锰铁 10, SiC 80	850	4	165	45 钢
B_4C 66, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 16, KF 10, C 8	900	5	240	—

表 12-146 几种气体渗硼剂与工艺

渗 硼 剂	处 理 工 艺		渗硼层厚度 /mm	备 注
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/h		
$\text{B}_2\text{H}_6 : \text{H}_2 = 1 : 25 \sim 75$	850	扩散 2 ~ 3 2 ~ 4		B_2H_6 有剧毒, 价格昂贵
$\text{BCl}_3 : \text{H}_2 = 5 \sim 10 : 100$	750 ~ 950	3 ~ 6	纯铁 0.1 ~ 0.3	BCl_3 易堵塞和腐蚀管道
$\text{BCl}_3 : \text{H}_2 = 5 \sim 10 : 100$				开始通 N_2 排气与保护冷却

表 12-147 几种膏剂渗硼成分与工艺

涂料成分 (质量分数) (%)	处 理 工 艺		渗层厚度 / μm	相组成
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/h		
(Al_2O_3 50, B_4C 50) 80, Na_3AlF_6 20	800 ~ 1050	2 ~ 4	0.03 ~ 0.25	$\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$
B_4C 80, Na_3AlF_6 20	800 ~ 1050	2 ~ 4	0.03 ~ 0.25	$\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$
B_4C 40 ~ 60, NaF 40 ~ 60 (用亚硫酸盐酒精粘合)	1100	0.15 ~ 0.2	0.09 ~ 0.12	$\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$

表 12-148 几种电解渗硼成分与工艺

熔液成分 (质量分数) (%)	处 理 工 艺		渗层厚度 / μm	相组成
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/h		
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (电流密度 0.1 ~ 0.3 A/cm^2)	800 ~ 1000	2 ~ 6	0.06 ~ 0.45	$\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 40 ~ 60, B_2O_3 40 ~ 60 (电流密度 0.2 ~ 0.25 A/cm^2)	900 ~ 950	2 ~ 4	0.15 ~ 0.35	$\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$

(续)

熔液成分 (质量分数) (%)	处 理 工 艺		渗层厚度 / μm	相组成
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/h		
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 80, NaCl 20 (电流密度 $0.1 \sim 0.2 \text{ A/cm}^2$)	800 ~ 950	2 ~ 4	0.05 ~ 0.3	$\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 85, Na_2HPO_4 15 (Na_3PO_4)	650 ~ 800	4 ~ 6	0.025 ~ 0.1	$\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 90, NaOH 10	650 ~ 800	4 ~ 6	0.025 ~ 0.1	$\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$
LiCl 30, NaCl 2, KCl 38, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 15, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 9, $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 6	550 ~ 750	2 ~ 10	0.02 ~ 0.08	$\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$

表 12-149 钢中碳含量对渗层中 FeB 、 Fe_2B 的相对量及硬度的影响

钢材	碳含量 w_{C} (%)	渗硼温度 / $^{\circ}\text{C}$	渗硼时间 /h	相成分相对含量 (%)		显微硬度 HV0.02	
				FeB	Fe_2B	FeB	Fe_2B
工业纯铁	0.06	950	3	64	36	2100	1450
15 钢	0.13	950	3	58	42	2030	1440
40 钢	0.42	950	3	56	44	1860	1450
T7 钢	0.74	950	3	54	46	1750	1430

表 12-150 45 钢常用粉末渗硼剂成分与渗硼工艺

渗剂成分 (质量分数) (%)	处 理 工 艺		渗层厚度 /mm	渗 层
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/h		
B_4C 57 ~ 58, Al_2O_3 40, NH_4Cl 3 ~ 2	950 ~ 1050	3 ~ 5	0.1 ~ 0.3	双相 ($\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$)
B_4C 95, Al_2O_3 2.5, NH_4Cl 2.5	950	5	0.6	双 相
B_4C 80, Na_2CO_3 20	900 ~ 1100	3	0.09 ~ 0.32	双 相
B_4C 5, KBF_4 5, SiC 90	700 ~ 900	3	0.02 ~ 0.1	双 相
KBF_4 10, SiC 50 ~ 80, 余硼铁	850	4	0.09 ~ 0.1	单相 (Fe_2B)
硼铁 50, Al_2O_3 49 ~ 49.5, NH_4Cl ~ 0.5	900 ~ 1000	2 ~ 10		单 相

表 12-151 20 钢渗硼温度和时间与层深的关系

渗硼温度/ $^{\circ}\text{C}$	渗硼时间/h	渗层深度/ μm	渗硼温度/ $^{\circ}\text{C}$	渗硼时间/h	渗层深度/ μm
950	3	260	800	3	100
900	3	190	700	3	44
850	3	150			

表 12-152 硼铝共渗工艺

工艺方法	渗剂组成 (质量分数) (%)	工艺参数	渗层组织及厚度
粉末法	供硼剂 90 (B_4C 84, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 16) 加供铝剂 10 (铝铁粉 97, NH_4Cl 3)	$1100^{\circ}\text{C} \times 6\text{h}$	45 钢渗层由 FeB 、 Fe_2B 、 Fe_3Al 组成, 厚度 0.36mm
	50% 供硼剂 (B_4C 84, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 16) 加 50% 供铝剂 (铝铁粉 97, NH_4Cl 3)	$1100^{\circ}\text{C} \times 6\text{h}$	45 钢渗层由 FeAl 、 Fe_2B 组成, 厚度 0.23mm
液体法	由硼砂、中性盐、氧化铝、铝、铁粉、氟化铝、碳化硼等组成	$840 \sim 870^{\circ}\text{C} \times 3 \sim 4\text{h}$	厚度 0.07 ~ 0.13mm

(续)

工艺方法	渗剂组成 (质量分数) (%)	工艺参数	渗层组织及厚度
熔盐电解法	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 18, Al_2O_3 27.5, Na_2O 54.5	900 ~ 950℃ 保温 0.5h, 电流密度 $\leq 0.4\text{A}/\text{cm}^2$	共渗层深度约 0.07mm
膏剂法	由碳化硼、氟硼酸钾、碳化硅、氟化钠、 氧化铁组成, 另加粘结剂	850 ~ 950℃ 保温 3 ~ 5h	可获 0.05 ~ 0.1mm 共渗层

表 12-153 硼铬共渗与复合渗的渗剂与配方

工艺方法		渗剂配方 (质量分数) (%)	工 艺
共 渗	粉末法	无定形硼 5 + 铬粉 63.5 + Al_2O_3 30 + NH_4Cl 11.5	1000℃ × 8h
	盐浴电解法	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 50 ~ 52, Cr_2O_3 5 ~ 3, SiCl_4 , B_4C 5, Na_3AlF_6 20, KCl 10	(850 ~ 900℃) × 2h, 阴极电流密度 (0.1 ~ 0.2) A/cm^2
复合渗	膏剂法渗硼 + 粉末 法渗铬	渗硼膏剂: B_4C 10, Na_3AlF_6 10, CaF_2 80	900℃ × 1 ~ 2h
		铬铁合金 50, 氧化铝 48, NH_4Cl 2	1050℃ × 3h
	粉末渗铬 + 电解渗 硼	渗铬: 铬铁 50, Al_2O_3 43, NH_4Cl 7	1050℃ × 6h
		渗硼盐浴: 硼砂 50, B_4C 50	900℃ × 2h, 电流密度 0.24 A/cm^2

表 12-154 混合物成分和硼铬共渗规范对各种材料渗层的厚度、相组成和硬度的影响

渗入方法	混合物的成分 (质量分数) (%)	处理规范		材料	渗层 厚度 / μm	渗层的相组成	渗层显微硬度 HV		
		温度 /℃	时间 /h				外部	中间	内部
电解同时渗入 ($i = 0.1 \sim 0.2\text{A}/\text{cm}^2$) 顺序渗入: 粉末渗铬电解 渗硼 ($i = 0.24\text{A}/\text{cm}^2$) 液体同时渗入	1. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 90 ~ 95, Cr_2O_3 10 ~ 5	800 ~ 1000	2 ~ 4	纯铁	—	(Fe, Cr)B, (Fe, Cr) ₂ B	2250 ~ 1900	1900	—
	2. B_2O_3 75 ~ 80, NaF 22 ~ 12, Cr_2O_3 3 ~ 8	800 ~ 1000	1 ~ 6	45 钢	80	(Fe, Cr)B, (Fe, Cr) ₂ B, 碳硼化物	1900	1600	400
	FeCr 50, Al_2O_3 43, NH_4Cl 7 硼砂或 50 硼砂, B_4C 50	1500	6	CrWMn	45	Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 , CrB_2 , Cr_2B , (Fe, Cr) ₂ B, 碳硼 化物	1550	1100	520
固体同时渗入	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 70 ~ 80, Cr_2O_3 5 ~ 15, CK15 ~ 25	900 ~ 1050	2 ~ 4	纯铁 45 钢	100 ~ 15	(Fe, Cr)B, (Fe, Cr) ₂ B	2300	1850	—
	1. B 10 ~ 30, Cr 90 ~ 70, 活性剂	900 ~ 1100	6 ~ 10	钢、合金	10 ~ 50	(Fe, Cr)B, (Fe, Cr) ₂ B	2200	1850	—
	2. B 5, Cr 63.5, Al_2O_3 30, NH_4Cl 11.5	1000	8	GCr15	80	(Fe, Cr) ₃ · (C, B) ₂ ;	2000	1800	480
		1000	8	4Cr13	30	(Fe, Cr) ₂₃ · (C, B) ₆	1800	1500	500
	3. B_4C 98.5, Cr 15 (粉末), 活性剂	950	6	45 钢	180	(Fe, Cr) ₂ B, (Fe, Cr)B (7.52% Cr)	2250	1850	—
		1050	6	45 钢	370	(Fe, Cr) ₂ B (16.4% Cr)	2250	1850	—
	4. CrB_2 47, 惰性添加 剂 50, 活性剂 3	900	4	40Cr	80	(Cr, Fe)B, (Fe, Cr) ₂ B	1900	1600	—
		1000	4	40Cr	200	(10% Cr)			
		1100	4	40Cr	280				

(续)

渗入方法	混合物的成分 (%) (质量分数)	处理规范		材料	渗层 厚度 / μm	渗层的相组成	渗层显微硬度 HV		
		温度 / $^{\circ}\text{C}$	时间 /h				外部	中间	内部
固体同时渗入	5. 糊膏: $\text{B}_4\text{C}58$, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_738$, $\text{Cr}3$ (粉末), $\text{NH}_4\text{Cl}1$ (粘结剂——B Φ -2 胶在丙酮中的溶液)	1000 (电热)	0.2	T8	40	(Fe, Cr) (B, C)、 (Fe, Cr) $_2$ B	3000	2600	—
	6. 糊膏: Cr_2O_3 、Al、B、NaCl、NaF、 Na_3AlF_6 (粘结剂——乙基硅酸盐, B Φ -2 溶液、硝基纸浆在丙酮中的溶液)。在 100°C 烘干)	1200 (高频电流)	0.25	钢 铸铁	0.1 ~ 1.5 mm 0.1 ~ 1.5	(Fe, Cr) $_2$ B Cr 和 B 在 αFe 中的固溶体、碳化物	1100 —	800 —	600 —
浮渣粉末	Cr、 CrB_2 ——涂料。 Cr、B、 Al_2O_3 和活性剂的粉末状混合物。在该混合物中或在保护气氛中加热	900 ~ 1000	2 ~ 6	钢和合金	50 ~ 300	(Cr, Fe)B、(Cr, Fe) $_2$ B	1500	—	—
熔镀	硼化铬, 随后渗硼或退火	900 ~ 1000	4 ~ 6	钢和合金	—	(Cr, Fe)B、(Cr, Fe) $_2$ B、 (Me) $_{23}\text{C}_6$	1000 (固溶体); 1700 ~ 1400 (夹杂物)	—	—

表 12-155 混合物成分和硼钛共渗规范对各种材料渗层的厚度、相组成和硬度的影响

渗入方法	混合物的成分 (质量分数) (%)	化学热处理规范		材料	渗层 厚度 / μm	相组成或合 金元素浓度	渗层显微硬度 HV		
		温度 / $^{\circ}\text{C}$	时间 /h				外部	中间	内部
固 体 处 理 方 法									
同时 渗入	1. B40 ~ 60, Ti30 ~ 60 + 活性剂 (可以添加达 Al_2O_3 50)	900 ~ 1050	6 ~ 15	纯铁	< 100	Fe_2B (单个针), 固溶 体, 钛化铁	1800	1600	—
				合金	< 70	B 和 Ti 在 Ni 中的固溶 体, 硼化钛	650	950 ~ 1300	400
	2. B_4C 10 ~ 25, FeTi 55 ~ 65, Al_2O_3 20, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 3, NH_4Cl , NaCl	1100	6	纯铁, T8	50 25		2100 1600	300 300	— —
顺序 渗入	1. 渗硼时: B_4C 84, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 16 和活性 剂	1050 (B)	6	纯铁	~ 400	FeTi_2 , TiB_2 , Fe_2B , B	3200 ~ 3400	1900 ~ 1500	450
		1000 (Ti)	2	纯铁		和 Ti 在铁中的固溶体			
		1000 (B)	< 15	合金	~ 200	—	1900 ~ 1800	1400 ~ 1000	—
			900 (Ti)	< 12	合金		—		

(续)

渗入方法	混合物的成分 (质量分数) (%)	化学热处理规范		材料	渗层 厚度 /μm	相组成或合 金元素浓度	渗层显微硬度 HV		
		温度 /℃	时间 /h				外部	中间	内部
顺序 渗入	渗钛时: Ti70 (或含 Ti47 的钛铁) Al ₂ O ₃ 25, NH ₄ Cl5	1050 (B) 1100 (Ti)	2 2	45 钢 纯铁	~ 320	FeTi ₂ , TiB ₂ , B 和 Ti 在 Fe 中的固溶体	—	2500 ~ 2000	200
	2. 渗钛时: Ti70 (或钛铁), Al ₂ O ₃ 25, NH ₄ Cl5	1000 (Ti) 900 (B)	4 4	纯铁 纯铁	—	Fe ₂ B, FeTi ₂ , 硼化物夹 杂	1000	800	—
	渗硼时: B ₄ C84, Na ₂ B ₄ O ₇ 16 和 活 性剂	900 (Ti) 900 (B)	12	合金 合金	60	金属间化合物, 以 Ni 为基的固溶体	700 ~ 800	650 ~ 1000	— —
	电 解 处 理 方 法								
同时 渗入	($i = 0.2 \sim 0.4 \text{ A/cm}^2$), Na ₂ B ₄ O ₇ 90 ~ 70, TiO ₂ 10 ~ 30, Ti (海绵、粉末)	950 ~ 1050	4 ~ 6	钢, 合金	—	—	—	—	—
浮渣、浮渣-粉末或粉末处理法									
	悬浮液: B, TiB ₂ , 粘 剂: 在 TiB ₂ 48, Al ₂ O ₃ 50, 活 性剂 2 的粉末中加热	1000	4	40Cr	75	(Fe, Ti) B, Fe ₂ B, (B + Ti) ≈ 20%	—	—	—

表 12-156 渗硼的温度和持续时间对含钛钢的渗层的厚度的影响

钛含量 (质量分数) (%)	在下列温度 (°C) 下的渗层厚度/μm			
	900	950	1000	1050
纯铁	90 ~ 120	125 ~ 180	—	—
0.59	45 ~ 65	90 ~ 130	175 ~ 240	200 ~ 300
1.12	35 ~ 50	75 ~ 120	100 ~ 150	150 ~ 210
1.64	25 ~ 45	70 ~ 100	90 ~ 130	130 ~ 175

注: 分子为 3h 的数值, 分母为 5h 的数值。

表 12-157 混合物成分和硼锆共渗规范对各种材料渗层的厚度、相组成和硬度的影响

渗入方法	混合物的成分 (%) (质量分数)	处理规范		材料	渗层 厚度 /μm	相组成	渗层显微硬度 HV		
		温度 /℃	时间 /h				外部	中间	内部
电解 (电 流密 度 0.1 ~ 0.3 A/cm ²)	1. Na ₂ B ₄ O ₇ 70 ~ 80, ZrO ₂ 5 ~ 10, NaF20 (或 NaCl7 ~ 10)	900	5	Q235	224	(Fe, Zr) B, (Fe, Zr) ₂ B, Zr ₂ B	1900	2000	300
	2. KF 75% (mol), (3K ₂ ZrF ₆ , 2B ₂ O ₃) 25% (mol)	760 ~ 1000	2 ~ 5	钢, 合金	—	—	—	—	—
液体非电解	Na ₂ B ₄ O ₇ 65, B ₂ O ₃ 10, 硅 锆合金 25	950	4	45 钢	165	(Fe, Zr)B, (Fe, Zr) ₂ B	2100	1700	300
浮渣、浮渣- 粉末或粉末	悬浮液: B, ZrB ₂ 、粘 剂。在 ZrB ₂ 43, Al ₂ O ₃ 50, 3 活性剂的粉末混合物 中加热	1000	4	40 钢	120	(Fe, Zr)B, (Fe, Zr) ₂ B	1800	—	—
顺序渗入	工业用的 B ₄ C 和活性 剂	950	5	含 Zr1.5% 的钢	75	(Fe, Zr)B, (Fe, Zr) ₂ B	2250	1900	—

表 12-158 在含 $w_{Na_2B_4O_7}$ 65% + w_{NaCl} 10% + $w_{C+其他}$ 25% 的熔体中
渗硼的规范对钢渗层厚度的影响

处理规范		在纯铁和钢上的渗层厚度/ μm								
$t/^\circ C$	τ/h	纯铁	45 钢	65Mn	T8	7Cr3	5CrNiW	GCr15	3Cr2W8V	Cr12V1
850	2	80	50	30	30	—	40	25	10	10
	4	115	85	65	60	—	75	75	25	20
	6	140	115	90	80	—	100	90	35	30
900	2	120	80	60	55	50	60	45	20	15
	4	160	125	100	90	90	100	90	35	30
	6	205	160	125	120	120	125	115	45	40
950	2	150	125	95	90	85	105	80	35	30
	4	215	165	140	130	130	140	130	50	45
	6	270	190	170	160	170	170	155	60	55
1000	2	205	160	135	130	130	140	110	50	45
	4	280	220	180	185	180	190	185	70	60
	6	345	275	220	225	220	230	225	85	70

表 12-159 渗硼温度和持续时间对含铬钢的渗层厚度的影响

Zr (%) (质量分数)	在下列温度 ($^\circ C$) 时的渗层厚度/ μm			
	900	950	1000	1050
纯铁	90/120	125/180	—/—	—/—
0.56	30/55	75/110	125/175	200/275
1.05	25/45	55/85	100/150	170/235
1.48	20/25	50/75	80/125	150/220

注：分子为 3h 的数值，分母为 5h 的数值。

表 12-160 在 w_{SiC} 30% ~ 35% , $w_{Na_2B_4O_7}$ 65% ~ 70% 熔体中
渗硼的温度和持续时间对钢的渗层厚度的影响

钢号	时间 $/h$	渗层 厚度 $/\mu m$	连续硼 化物层 的厚度 $/\mu m$	渗层 厚度 $/\mu m$	连续硼 化物层 的厚度 $/\mu m$	渗层 厚度 $/\mu m$	连续硼 化物层 的厚度 $/\mu m$	渗层 厚度 $/\mu m$	连续硼 化物层 的厚度 $/\mu m$
纯铁	2	$t = 900^\circ C$		$t = 950^\circ C$		$t = 1000^\circ C$		$t = 1050^\circ C$	
	4	—	—	60	10	80	15	120	25
	6	—	—	80	25	125	30	225	45
	10	—	—	110	35	190	45	255	80
20	2	—	—	205	45	315	85	300	85
	4	—	—	40	20	70	35	110	70
	6	—	—	105	50	140	85	195	105
45	2	—	—	135	85	160	90	250	160
	4	—	—	40	20	55	35	105	65
	6	—	—	105	65	135	70	170	135
40Cr	2	—	—	140	110	175	245	280	180
	4	25	5	30	5	50	10	105	40
	6	45	15	65	20	90	30	160	65
	6	65	20	85	25	115	35	205	85

(续)

钢号	时间 /h	渗层 厚度 / μm	连续硼 化物层 的厚度 / μm	渗层 厚度 / μm	连续硼 化物层 的厚度 / μm	渗层 厚度 / μm	连续硼 化物层 的厚度 / μm	渗层 厚度 / μm	连续硼 化物层 的厚度 / μm
		$t = 900^\circ\text{C}$		$t = 950^\circ\text{C}$		$t = 1000^\circ\text{C}$		$t = 1050^\circ\text{C}$	
65Mn	2	—	—	40	30	55	40	125	90
	4	—	—	80	55	115	95	180	145
	6	—	—	125	100	155	140	210	185
20CrMnTi	2	20	5	30	5	50	15	100	35
	4	45	15	60	15	90	30	145	60
	6	65	25	85	25	110	35	180	85
3Cr2W8V	2	15	5	20	15	40	30	70	60
	4	25	20	40	20	55	30	120	85
	6	30	20	50	20	75	40	155	110
T8	2	35	0	45	20	60	25	125	75
	4	60	20	75	30	110	35	195	110
	6	70	30	100	35	150	45	250	165
5CrNiW	2	35	20	40	15	60	30	130	75
	4	55	35	70	35	100	50	195	105
	6	65	30	90	50	135	60	240	130
GCr15	2	25	5	35	20	50	30	105	75
	4	35	20	65	35	95	45	160	110
	6	50	20	85	55	125	35	210	120
CrWMn	2	—	—	10	—	20	—	35	—
	4	—	—	20	—	30	—	70	—
	6	—	—	30	—	40	—	80	—
Cr12V1	2	15	5	20	10	35	25	70	50
	4	20	10	35	15	55	30	110	75
	6	30	20	45	25	65	35	130	95

表 12-161 在 $w_{\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7}$ 70%, $w_{\text{B}_4\text{C}}$ 30% 熔体中渗硼的温度和

持续时间对钢的渗层厚度的影响

钢号	时间 /h	渗层 厚度 / μm	连续硼 化物层 的厚度 / μm	渗层 厚度 / μm	连续硼 化物层 的厚度 / μm	渗层 厚度 / μm	连续硼 化物层 的厚度 / μm	渗层 厚度 / μm	连续硼 化物层 的厚度 / μm
		$t = 850^\circ\text{C}$		$t = 900^\circ\text{C}$		$t = 950^\circ\text{C}$		$t = 1000^\circ\text{C}$	
纯铁	2	75	40	100	60	130	85	176	100
	4	105	55	135	80	180	110	260	160
	6	130	70	175	95	250	140	320	200
45	2	30	20	50	39	110	50	125	70
	4	65	40	90	50	150	90	200	140
	6	95	60	110	70	170	120	230	170
T8	2	20	15	40	25	65	45	100	75
	4	45	30	75	55	110	85	160	120
	6	75	50	110	80	145	100	210	160

(续)

钢号	时间 /h	渗层 厚度 / μm	连续硼 化物层 的厚度 / μm	渗层 厚度 / μm	连续硼 化物层 的厚度 / μm	渗层 厚度 / μm	连续硼 化物层 的厚度 / μm	渗层 厚度 / μm	连续硼 化物层 的厚度 / μm
		$t = 850^\circ\text{C}$		$t = 900^\circ\text{C}$		$t = 950^\circ\text{C}$		$t = 1000^\circ\text{C}$	
65Mn	2	20	10	40	25	80	50	115	80
	4	55	30	80	55	125	90	160	120
	6	85	55	110	80	150	110	205	150
GCr15	2	15	10	35	25	50	40	90	55
	4	40	30	70	55	100	80	145	90
	6	70	55	95	75	135	110	185	130
7Cr3	2	—	—	40	—	65	—	115	—
	4	—	—	70	—	110	—	170	—
	6	—	—	105	—	145	—	210	—
5CrNiW	2	25	—	45	—	75	—	120	—
	4	50	—	80	—	120	—	170	—
	6	90	—	105	—	150	—	220	—
3Cr2W8V	2	—	—	10	—	20~25	—	35~40	—
Cr12V1	4	—	—	20~25	—	40	—	55~60	—
	6	—	—	30~35	—	50~55	—	65~75	—

表 12-162 膏剂渗硼的规范对钢和纯铁渗层厚度的影响

化学热处理规范		纯铁和钢的渗层厚度/ μm				
$t/^\circ\text{C}$	τ/h	纯铁	45 钢	T8	CrWMn	Cr12V1
800	4	—	—	50	35	—
850	4	90	70	55	45	—
950	4	170	170	140	130	50
1000	2	140	—	—	—	50
1050	2	—	—	—	—	55
1100	2	—	—	—	—	75

表 12-163 在工业碳化硼粉末中渗硼的温度和持续时间对钢渗层厚度的影响

钢 号	在下列时间 (h) 时的渗层厚度/ μm											
	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6
		$t = 850^\circ\text{C}$			$t = 900^\circ\text{C}$			$t = 950^\circ\text{C}$			$t = 1000^\circ\text{C}$	
20 钢	40	70	90	60	110	150	80	160	210	140	240	330
45 钢	30	60	90	60	100	135	75	150	200	110	210	280
T8	30	55	70	40	75	110	75	150	195	105	180	230
9SiCr	30	55	70	40	70	100	55	100	150	95	175	210
CrWMn	25	50	70	35	65	95	45	90	140	85	170	225
3Cr2W8V	20	25	30	25	40	60	40	70	95	75	120	170
30CrMnSi	30	55	80	50	85	125	75	135	190	100	200	270

表 12-164 在 $[w_{\text{Al}_2\text{O}_3} 70\%, (x\% \text{Al} + y\% \text{B}_2\text{O}_3) 30\%]$ 99.5%, $w_{\text{NaF}} 0.5\%$ 混合物中

渗硼的规范对渗层厚度的影响

混合物的成分 (%) (质量分数)		处理规范		渗层厚度/ μm			混合物的成分 (%) (质量分数)		处理规范		渗层厚度/ μm		
Al	B ₂ O ₃	t/°C	τ/h	纯铁	45 钢	T8 钢	Al	B ₂ O ₃	t/°C	τ/h	纯铁	45 钢	T8 钢
10	90	1000	4	154	112	70	25 ^①	75	1000	4	210	175	155
20	80	1000	4	190	175	140	25 ^②	75	1000	4	160	105	85
25	75	1000	4	210	180	155	25	75	850	2	20	15	10
30	70	1000	4	220	195	175	25	75	850	4	30	20	15
35	65	1000	4	230	210	190	25	75	850	8	50	25	20
40	60	1000	4	255	245	210	25	75	950	2	60	40	35
50	50	1000	4	175	160	140	25	75	950	4	175	140	105
55	45	1000	4	245	225	210	25	75	950	8	210	175	155
60	40	1000	4	280	260	245	25	75	1050	2	245	200	175
25	75	1000	4	105	85	70	25	75	1050	4	280	240	200
25	75; NaF1.0	1000	4	190	140	105	25	75	1050	8	420	350	315
25	75; NaF2.0	1000	4	175	105	90							

① 加 Al₂O₃ 60%。② 加 Al₂O₃ 80%。

表 12-165 电解渗硼的温度和持续时间对钢的渗层厚度的影响

(电流密度 0.2 ~ 0.25 A/cm²)

钢号	τ/h	渗层厚度/ μm	连续硼化物层的厚度/ μm	渗层厚度/ μm	连续硼化物层的厚度/ μm	渗层厚度/ μm	连续硼化物层的厚度/ μm	渗层厚度/ μm	连续硼化物层的厚度/ μm
		$t = 850^\circ\text{C}$		$t = 900^\circ\text{C}$		$t = 950^\circ\text{C}$		$t = 1000^\circ\text{C}$	
30 钢	1	95	—	125	—	150	—	—	—
	3	170	—	220	—	270	—	—	—
	5	215	—	270	—	360	—	—	—
40Cr	2	80	60	120	100	160	130	220	150
	4	120	90	190	150	240	215	315	245
	6	150	95	220	165	310	—	320	—
20CrMnTi	2	75	50	120	90	155	115	210	140
	4	120	85	180	140	230	170	290	210
	6	140	95	200	140	270	—	290	—
T8	2	70	25	100	60	150	130	240	210
	4	130	79	160	115	220	170	340	280
	6	180	132	230	170	290	230	400	—
GCr15	2	40	21	80	50	110	105	150	110
	4	100	72	135	110	185	145	250	220
	6	140	103	180	175	245	195	310	—

(续)

钢号	τ /h	渗层 厚度 / μm	连续硼 化物层 的厚度 / μm	渗层 厚度 / μm	连续硼 化物层 的厚度 / μm	渗层 厚度 / μm	连续硼 化物层 的厚度 / μm	渗层 厚度 / μm	连续硼 化物层 的厚度 / μm
$t = 850^{\circ}\text{C}$ $t = 900^{\circ}\text{C}$ $t = 950^{\circ}\text{C}$ $t = 1000^{\circ}\text{C}$									
Cr12V1	2	15	15	35	30	55	45	90	75
	4	40	40	60	50	80	65	140	125
	6	55	45	70	60	90	75	175	160
5CrNiW	2	50	45	90	90	120	100	180	90
	4	100	85	150	130	195	150	315	300
	6	140	115	190	170	275	240	360	—
3Cr2W8V	2	15	10	40	35	60	55	100	85
	4	40	35	60	55	110	90	135	130
	6	45	40	80	65	140	—	210	—

表 12-166 零件局部防止渗硼用的涂覆方法和涂料

覆 层 类 型	涂覆方法	覆层厚度/ μm
铜 (黄铜、青铜)	电镀	0.08 ~ 0.15
铬	电镀	0.02 ~ 0.04
涂料: 酚醛塑料 ^① 60% ~ 10% + Al_2O_3 ^② 40% ~ 90% (均为质量分数) 以单质硼为基的涂料: 4g 非晶态硼 + 4mL 合成树脂 + 14mL 三氯乙烯	刷涂、喷涂 刷涂	0.5 ~ 1.0 —

① 酚醛塑料以溶于易挥发的有机液体 (酒精、丙酮等) 中的溶液形式使用。
② 20℃ 时干燥 2h; 250℃ 时烘干 2h。

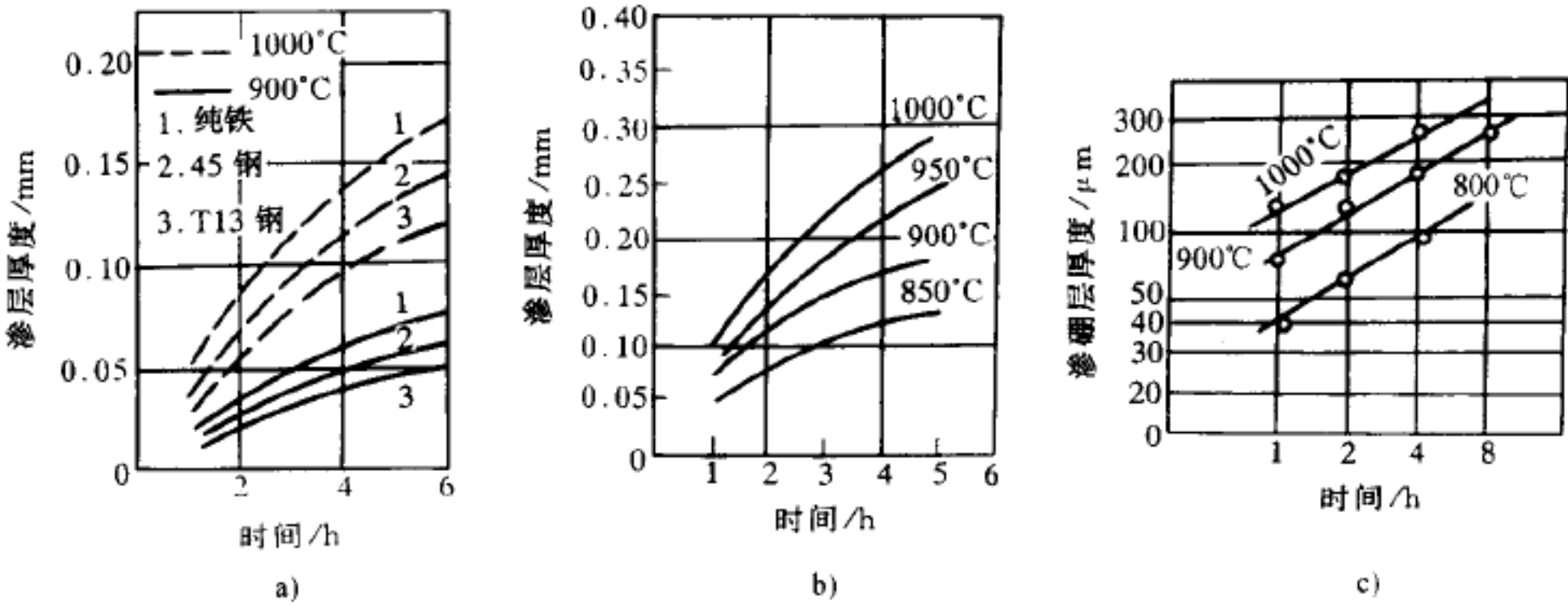


图 12-161 温度和时间对渗硼层厚度的影响

a) 粉末法 $w_{\text{硼铁}} 97\% + w_{\text{NH}_4\text{Cl}}$ (在 H_2 中) 3% b) 熔盐法 $w_{\text{N}_2\text{B}_4\text{O}_7} 60\% + w_{\text{B}_4\text{C}} 40\%$ c) 气体法 $\text{H}_2 + \text{BCl}_3$
($\text{H}_2 = 0.90\text{mol/h}$, $\text{BCl}_3 = 0.05\text{mol/h}$)

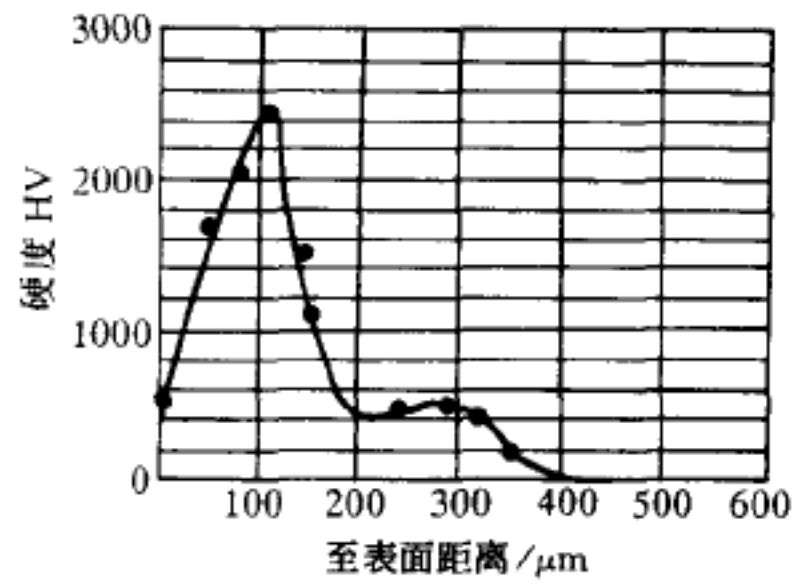


图 12-162 20 钢渗硼后的硬度分布
(气体渗硼, 800°C × 3h)

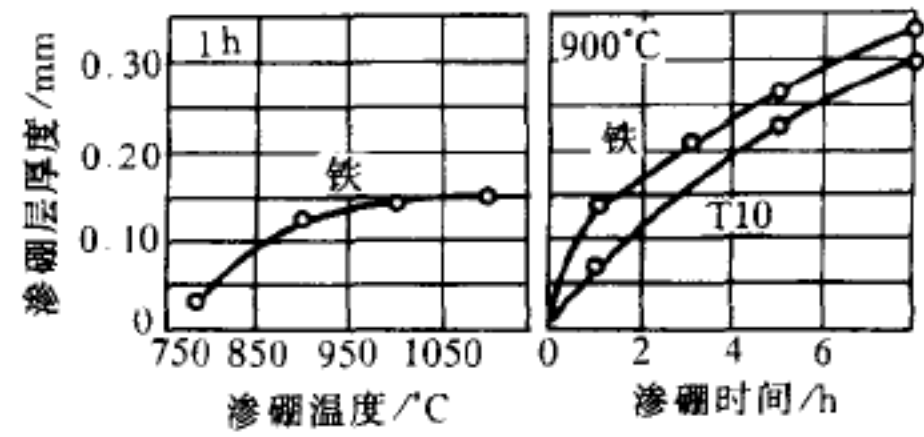


图 12-163 T10 钢渗硼时间和
温度对渗硼层深度的影响
(电解渗硼, 电流密度 0.75 A/cm²)

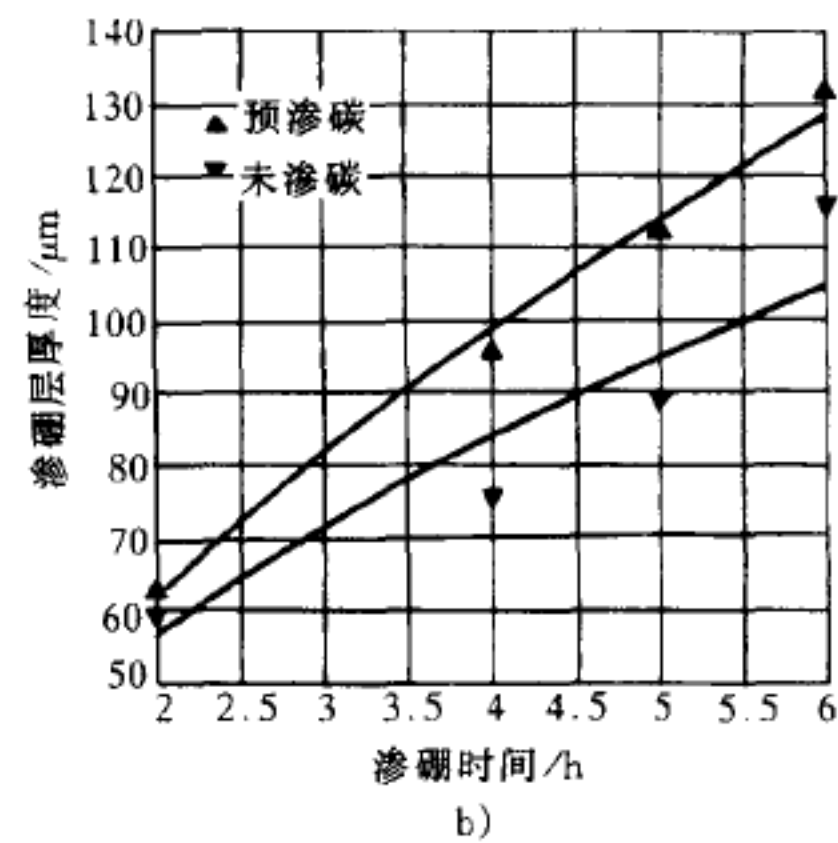
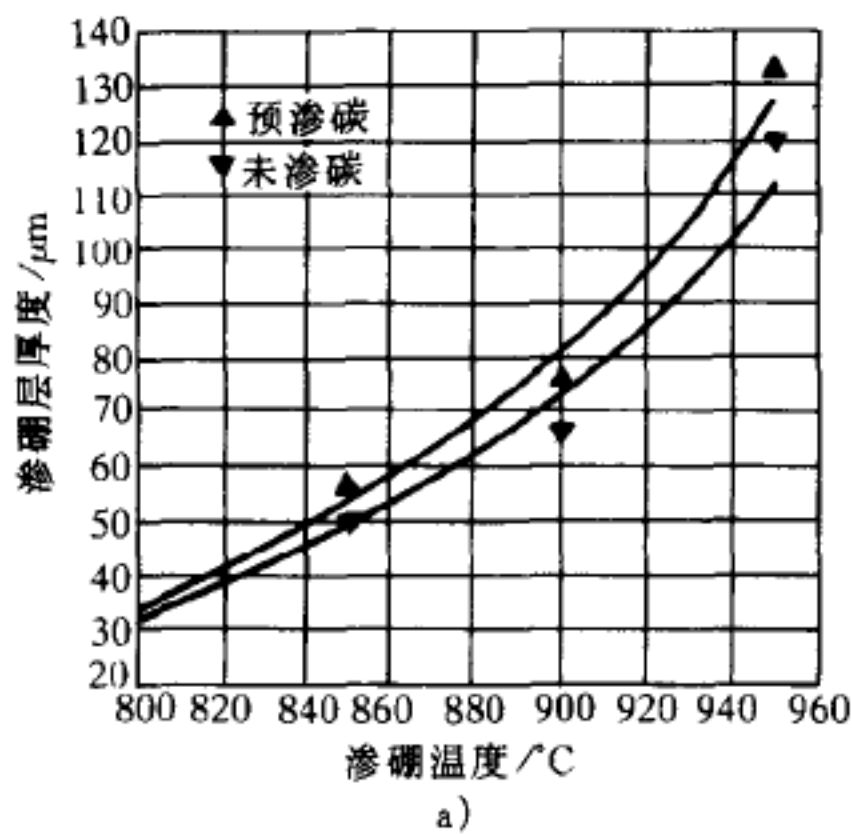


图 12-164 预渗碳对渗硼速度的影响

a) 不同温度下的渗硼结果, 时间 4.5h b) 不同时间的渗硼结果,
温度 930°C 20CrMnTi, 渗碳层深 0.8mm; 液体渗硼

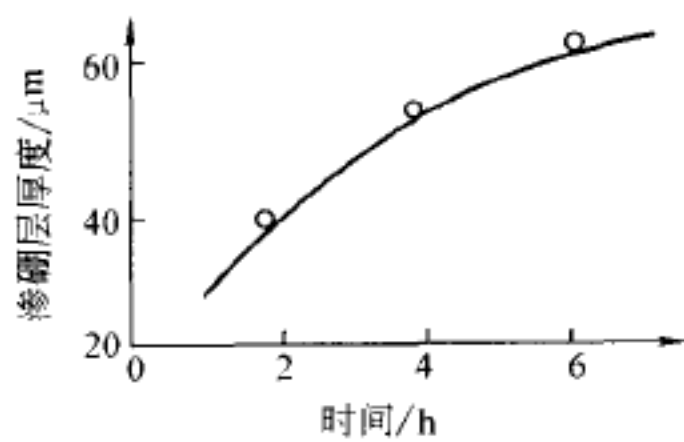


图 12-165 保温时间对 45 钢离子渗硼层
厚度的影响 (温度 700°C)

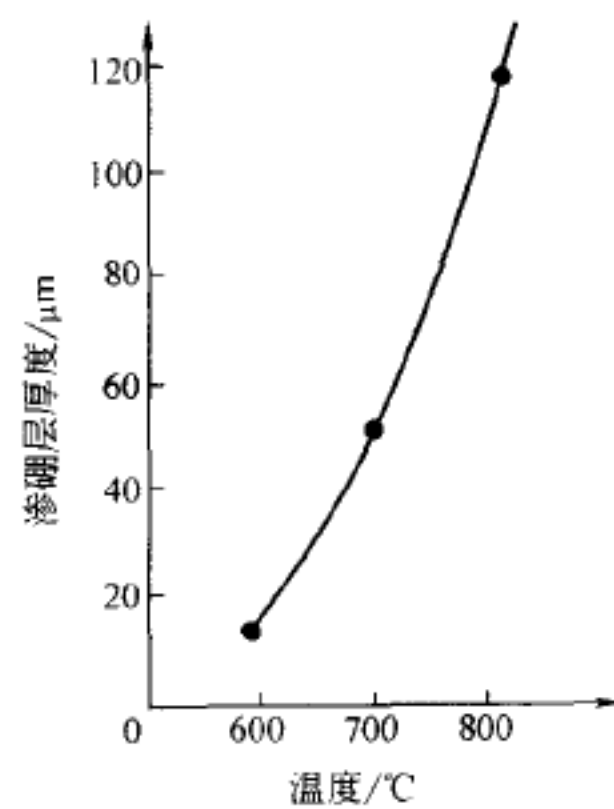


图 12-166 温度对 45 钢离子渗硼层
厚度的影响 (保温 4h)

12.6 渗硫与硫氮共渗工艺及性能(表 12-167 ~ 表 12-176 和图 12-167 ~ 图 12-181)

表 12-167 几种渗硫剂成分及工艺

方 法	渗硫剂成分 (质量分数)(%)	工 艺 参 数			备 注
		温度/℃	时间/min	电流密度/A·dm ⁻²	
低温液体 电解渗硫	KCNS75, NaCNS25	180 ~ 200	10 ~ 20	1.5 ~ 3.5	盐浴流动性好,零件表面灰色; 渗层均匀;摩擦系数 $\mu = 0.15$;电 压大于 2V 时,零件表面有硫磺 析出
	在盐浴(KCNS75, NaCNS25)中 再加入 $K_4Fe(CN)_6$ 0.1 和 K_3Fe (CN) ₆ 0.9	180 ~ 200	10 ~ 20	1.5 ~ 2.5	当电压为 2 ~ 4V 时,零件表面 无硫磺;当电压大于 4V 时,零件 表面析出硫磺
	KCNS(30 ~ 70), NH_4CNS (70 ~ 30)	180 ~ 200	10 ~ 20	3 ~ 6	
	KCNS73, NaCNS24, $K_4Fe(CN)_6$ 2, KCN0.07, NaCN0.03	100 ~ 200	10 ~ 20	2.4 ~ 4.5	通氮气搅拌,流量 59m ³ /h
	KCNS55, NaCNS40, KCN1.2, NaCN0.8, Na_2SO_4 0.04, $K_4Fe(CN)_6$ 2	250	7	3	
离子渗硫	$H_2S + H_2 + Ar$	500 ~ 560	60 ~ 120	—	渗硫层厚度可达 25 ~ 50 μ m

表 12-168 气氛对比对渗层硬度厚度及硫含量的影响(处理工艺:(520 ± 10)℃, 4h)

方案	气氛配比(氮:硫)	W18Cr4V		40Cr	
		渗层厚度/mm	渗层表面硬度 HV	渗层厚度/mm	渗层表面硬度 HV
1	氮 100:100%	0.1104	1302	0.28	692
2	15:1	0.110	1302	0.28	698
3	10:1	0.116	1283	0.31	676
4	5:1	0.130	1275	0.32	644
5	3:1	0.107	1197	0.27	575
6	2:1	0.093	1095	0.23	539

表 12-169 不同温度下渗层厚度与时间的关系

温度/℃ 时间/min	480 ± 10	530 ± 10	550 ± 10	温度/℃ 时间/min	480 ± 10	530 ± 10	550 ± 10
15	0.0288	0.0450	0.0512	75	—	0.0864	—
30	0.0416	0.0580	0.0672	90	—	0.0928	—
45	0.0514	0.0672	0.0800	120	—	0.1056	—
60	0.0576	0.0768	0.0915				

注: H_2S 流量 30L/min + NH_3 流量 300L/min。

表 12-170 高速钢拉刀离子硫氮共渗工艺

共渗时间 /min	480℃			500℃			520℃			540℃		
	表面 硬度 HV	渗层 深度 /μm	化合物 层厚度 /μm	表面 硬度 HV	渗层 深度 /μm	化合物 层厚度 /μm	表面 硬度 HV	渗层 深度 /μm	化合物 层厚度 /μm	表面 硬度 HV	渗层 深度 /μm	化合物 层厚度 /μm
15							891	37	无	946	44	无
30	927	38	无	980~1022	48~51	无	1033~1145	54~58	无	1145~1197	66~71	0.4
60	1045	54	无	1158	73	0.5	1195	88	0.7			
120	1208	73	0.6				1226	105	1.0			

表 12-171 电解渗硫零件的主要缺陷与预防措施

缺 陷	产生缺陷的主要原因	防止措施	补救方法
渗层太薄,有花斑,抗咬卡及减摩性能不佳	1. 沉渣量 $\geq 3.6\%$ 熔盐老化 2. 油渍未除尽 3. 渗硫浴含水量高	1. 监测沉渣量(充分搅动后立即用不锈钢棒取盐样,称重后水解滤取沉渣称重)及时回收,再生,加等量新盐 2. 改善脱脂工艺至工件表面能全部被水浸润 3. 久置不用再开炉渗硫必须空载运行4~10h脱除部分水分	熔盐更新后直接重渗或抛光后重渗
色泽不黑,呈黄铜色,摩擦性能欠佳	1. 渗硫温度偏高,形成了 FeS_2 相 2. 盐浴配方不当,形成了 FeSO_3 相	1. 降低渗硫温度 2. 调整熔盐配方	抛去不合格渗层,重渗
表面或局部表面生锈	渗硫后清洗时间太短或清洗水中含较多的 KCNS 与 NaCNS 等盐分, FeS 膜微孔中残存盐分较多	1. 及时更换清洗用水 2. 清洗水中添加清洗剂	抛去不合格渗层,重渗

表 12-172 硫氮共渗剂及工艺参数

方 法	硫氮共渗剂成分 (质量分数)(%)	工 艺 参 数		生产周期 /h	备 注
		温度/℃	时间/h		
无氰熔盐法	$\text{CaCl}_2 50$, $\text{BaCl}_2 30$, $\text{NaCl}_2 20$ (载体,加热介质)另外加 $\text{FeS} 8 \sim 10$,并将 NH_3 导入熔盐($1 \sim 3\text{L/min}$)	520~600	0.25~2	0.5~2.5	熔盐由30kg增至200kg,通氮量由 1L/min 增至 3L/min 。处理件的强化效果好,防锈能力较差
气体法	$< \text{H}_2\text{S} 0.5 \sim 10$ $\text{NH}_3 90 \sim 99.5$ 以上	500~590	1~3	2~4.5	炉膛容积越大, H_2S 含量应越低
	$\text{SO}_2 1 \sim 2$ $\text{NH}_3 98 \sim 99$	540~580	1~3	2~4.5	波兰首先开发,又名氧硫氮共渗
硫氮共渗与蒸汽处理相结合的复合处理	H_2O (蒸汽) $\text{NH}_3:\text{H}_2\text{S}=9:1$	540~560	1~1.5	2~2.5	其实质是在气体硫氮共渗前、后各进行一次蒸汽处理,每一单元为20~30min,共1~1.5h
离子法	$\text{H}_2\text{SO}_4 1 \sim 2$ $\text{NH}_3 40 \sim 60$ H_2 (余量)	480~600	1~4	3~6	抽真空至 $\geq 13.3\text{Pa}$ 通入三种气体,保温时保持133~666Pa

表 12-173 几种硫氮共渗法渗速的比较

硫氮共渗工艺	渗层厚度/mm	硫氮共渗工艺	渗层厚度/mm
高速钢离子硫氮共渗 $(550 \pm 10)^\circ\text{C}$, 15 ~ 30min	0.051 ~ 0.067	高速钢气体硫氮共渗 $550 \sim 560^\circ\text{C}$ 3h	0.04 ~ 0.05
高速钢液体硫氮共渗 $530 \sim 550^\circ\text{C}$, 1.5 ~ 3h	0.03 ~ 0.06	高速钢 C、N、O、S、B 多元共渗 $560 \sim 570^\circ\text{C}$ 2h	0.03 ~ 0.07
高速钢气体硫氮共渗 570°C , 6h	0.097		

表 12-174 硫氮碳共渗剂及工艺参数

方 法	商品名称 或代号	渗剂成分或配方 (质量分数)(%)	工 艺 参 数		生产周期 /h	备 注
			温度/ $^\circ\text{C}$	时间/h		
熔盐法	Sursulf	工作盐浴(基盐) CR_4 由钾、钠、锂的氰酸盐与碳酸盐和少量硫化钾组成;再生盐 CR_2 用于调整成分	500 ~ 590 (常用 560 ~ 580)	0.2 ~ 3	0.3 ~ 3.5	法国于 1975 年开发;无污染,应用面广,处理时间通常为 1 ~ 2h。本工艺已取代高氰熔盐法
熔盐法	LT 工艺	工作盐浴为基盐 J-1,成分与法国 CR_4 相同。加以调整的 J-2 基盐(无硫)则用于氮碳共渗或 QPQ 处理。再生盐 Z-1 与 CR_2 相同可用于调整硫氮碳共渗或氮碳共渗熔盐的成分	500 ~ 590 (常用 550 ~ 580)	0.2 ~ 3	0.3 ~ 3.5	国家“六五”重点科技攻关成果,兼具 Sursulf 及德国的 Melonite、QPQ 工艺的功能, SNC 共渗后的工件直接转入 Y-1 氧化浴(性能与 AB1 浴相同)的 LTC-1 处理与法国 oxynit 无异
熔盐法	ЛИБТ-6a	$(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ 57% K_2CO_3 38% $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 5%	500 ~ 590	0.5 ~ 3	0.7 ~ 3.5	原料无毒,工作状态下不断形成 KCN, NaCN, 有较大的毒性
气体法	—	NH_3 5%, H_2SO_4 0.02 ~ 2, 丙烷与空气制得的载气(余量)	500 ~ 650	1 ~ 4	2 ~ 5	必要时加滴碳当量小的煤油或苯,以提高碳势
	—	每 1L C_6H_6 中溶入 25g $(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{NHS}$ 及 9gS; NH_3 适量	500 ~ 650	1 ~ 4	2 ~ 5	在通氮的同时,滴入 CS_2 或其他含硫的有机液体供硫剂(例如将 NH_4CNS 溶于 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 中)均可
	DYGS 法	每 1L 含 C、N 的有机物液体(例如 CH_3OH 与 HCONH_2 各半中加入 $(\text{NH}_2)_2\text{CS}$ 及 $\text{H}_3\text{-BO}_3$ 各 8g	540 ~ 570	1 ~ 2	2 ~ 3	
膏剂法	—	ZnSO_4 37 K_2SO_4 18.5(或 Na_2SO_4 18.5) $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 37.5 KCNS 7 H_2O 14(另加)	550 ~ 570	2 ~ 4	3 ~ 5	适用于单件或小批生产的大工件的局部表面强化
粉末包装(固体)法	—	FeS 35 ~ 60 $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ 10 ~ 20 石墨粉(余量)	550 ~ 650	4 ~ 8	5 ~ 9	效率低,有粉尘污染
离子法	—	CS_2 NH_3	500 ~ 650	1 ~ 4	2 ~ 5	可用含 S 的有机溶液代 CS_2

表 12-175 盐浴硫氮碳共渗剂及其特点

渗剂(质量分数)(%)	特 点
$K_4Fe(CN)_6$ 75, $NaOH$ 13, $Na_2S_2O_3$ 12	原料中无氰化物,但反应产物中有氰化物;盐液消耗快,使用温度低(不能高于 $650^{\circ}C$)
$(NH_2)_2CO$ 55, K_2CO_3 45, 外加总量的 Na_2S	新配盐浴中, KCN 的含量可达 80% ~ 85%;反应产物中有氰化物
$(NH_2)_2CO$ 36, K_2CO_3 24, $Na_2S_2O_3$ 10, $K_4Fe(CN)_6$ 30	原料无毒,但反应物仍具有一定毒性
国产商品化盐浴 J-1 及其再生用盐 Z-1, 熔盐成分: $CNO^- = 40 \sim 42$ $K^+ + Na^+ + Li^+ = 42 \sim 45$ $S^{2-} = (10 \sim 20) \times 10^{-6}$ $CO_3^{2-} = 14 \sim 17$ $CN^- \leq 0.1$	成品呈灰白色,熔点约 $450^{\circ}C$,熔融状态密度为 $1.7g/cm^3$ 。再生盐加入量 $= 1.15M\Delta(CNO^- \%)$,式中 $\Delta(CNO^- \%)$ 为要求值(范围的上限)与实际值之差。定量加完 Z-1 后 5 ~ 10min,盐浴中的 $CNO^- \%$ 可达到最佳值的 $\pm 1\% \sim 2\%$ 以内

表 12-176 无污染硫氮碳共渗层的厚度与化合物层硬度

工件名称	材 质	主要工艺参数		共渗层深度/ μm			化合物层致密区最高硬度/ $HV0.025_{max}$
		温度/ $^{\circ}C$	时间/h	化合物层	主扩散层	渗层总深度	
冷冻机能量调节阀	45 钢	565 ± 10	1.5 ~ 2	18 ~ 24	180 ~ 290	400 ~ 600	650
齿 轮	35CrMoV	550 ± 10	1.5	13 ~ 17			
链 板	20 钢	565 ± 10	2 ~ 3	20 ~ 28	200 ~ 320	650 ~ 1000	500
铝合金压铸及挤压模	3Cr2W8V	565 ± 10	2 ~ 3				1000
冷 冲 模	Cr12MoV	520 ± 10	3 ~ 4				1050
刀 具	W18Cr4V	560 ± 10	0.2 ~ 0.6		20 ~ 50	—	1100
齿轮缸套及轴	1Cr18Ni9Ti	565 ± 10	2 ~ 3				
潜卤泵叶轮	ZGCr28	565 ± 10	3	10 ~ 14	15 ~ 20	—	
曲 轴	QT600-2	565 ± 10	1.5 ~ 2	14 ~ 18	60 ~ 100	200 ~ 300	900
缸 套	HT200	565 ± 10	1.5 ~ 2	12 ~ 15	60 ~ 100	200 ~ 300	800

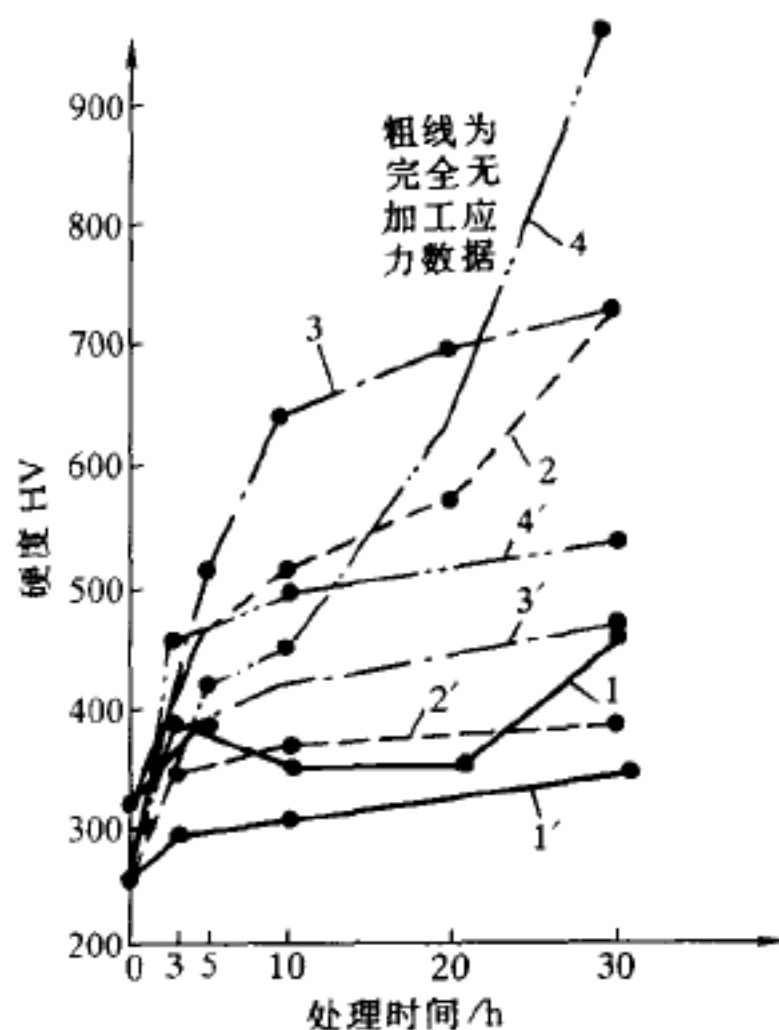
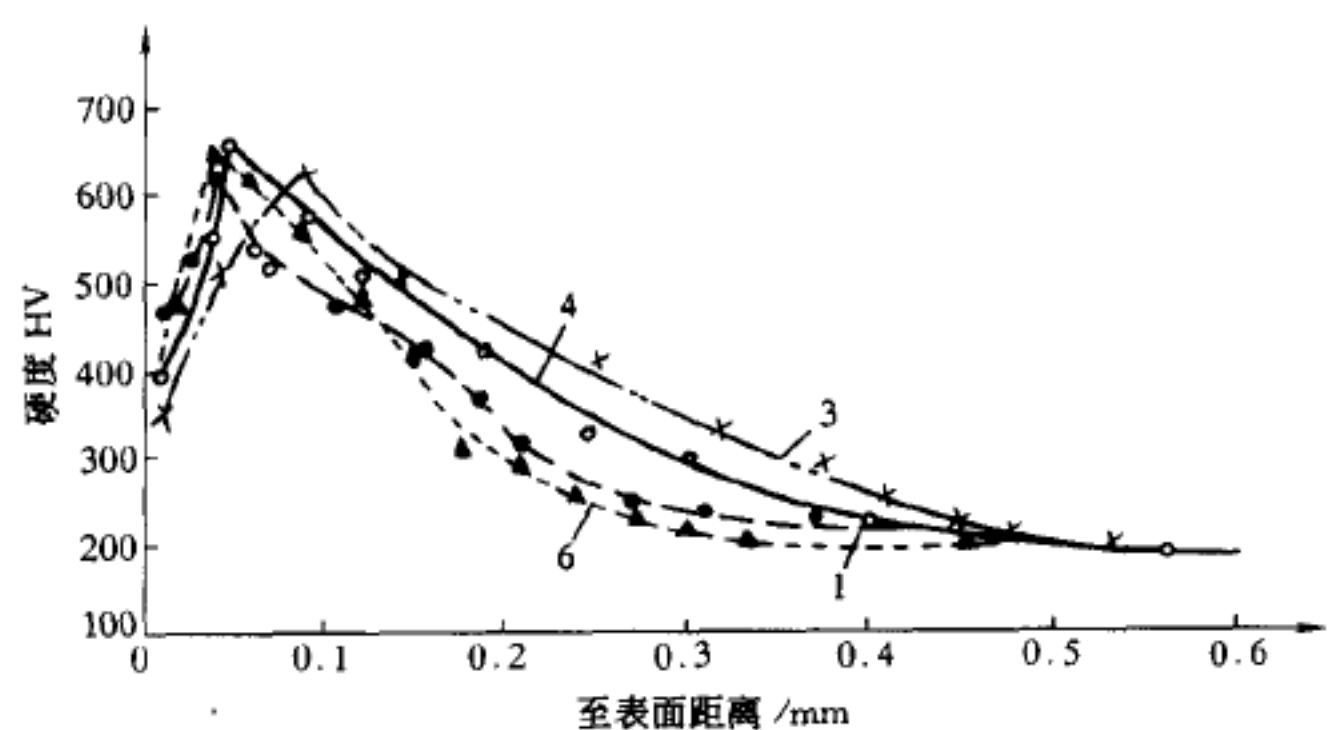


图 12-167 35 钢渗硫时间与硬度的关系

1— $150^{\circ}C$ 2— $200^{\circ}C$ 3— $250^{\circ}C$ 4— $300^{\circ}C$

1~4—完全无加工应力 1'~4'—有一些加工应力

图 12-168 20 钢 $570^{\circ}C$, 3h 离子硫氮共渗不同

方案处理后的硬度分布

〔方案 1(10:1)、4(20:1)、3(30:1)、

6(60:1)中的数字比是 NH_3 与 H_2S 之比〕

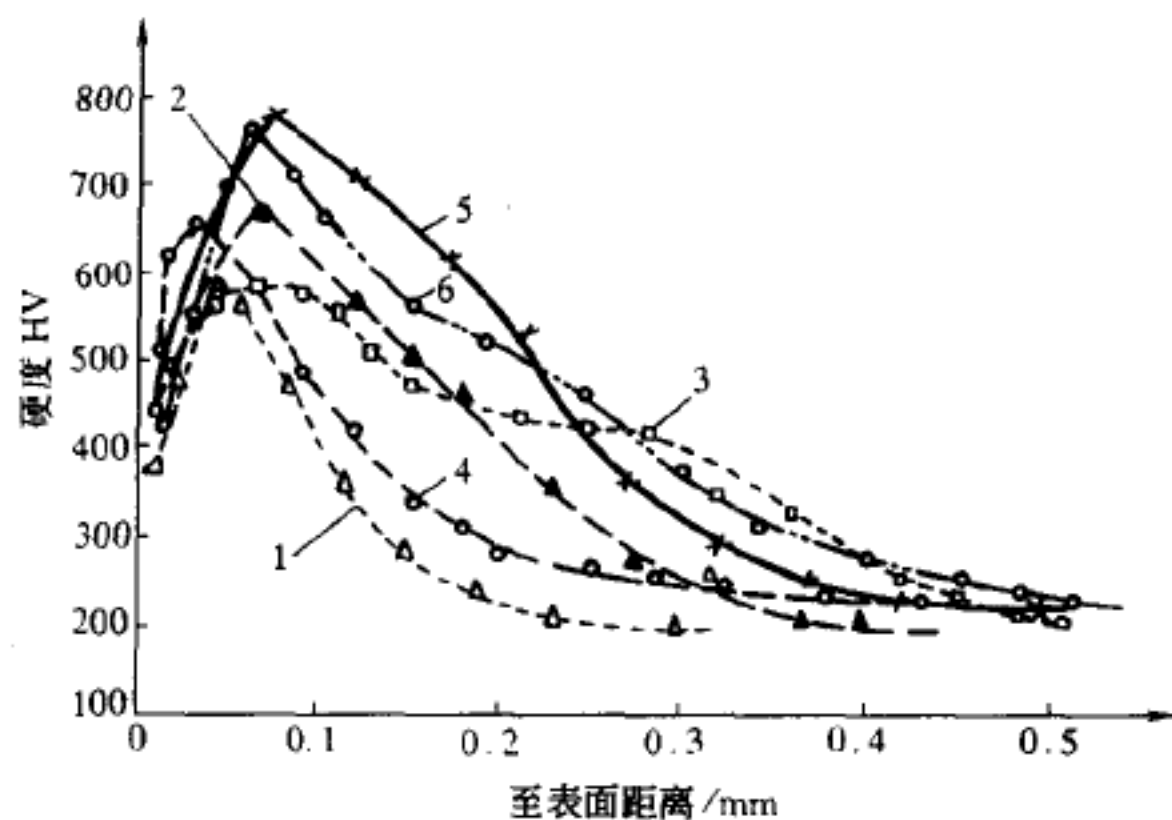


图 12-169 20 钢离子硫氮共渗不同时间后的硬度分布

(按方案 5 为 570°C , $\text{NH}_3:\text{H}_2\text{S}=30:1$)

1—20 钢 $\times 1\text{h}$ 2—20 钢 $\times 2\text{h}$ 3—20 钢 $\times 3\text{h}$
4—20CrMnTi $\times 1\text{h}$ 5—20CrMnTi $\times 2\text{h}$
6—20CrMnTi $\times 3\text{h}$

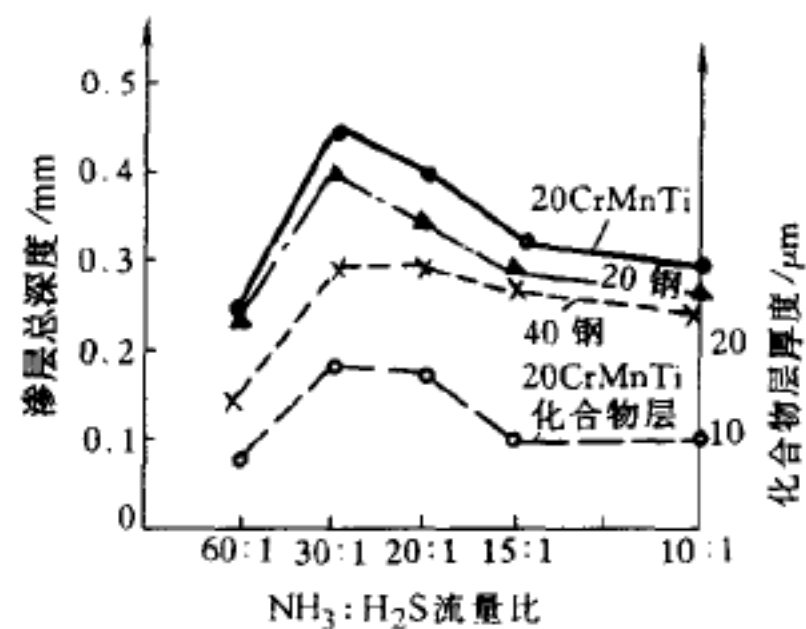


图 12-170 20、45、20CrMnTi 钢离子硫氮共渗时 $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{S}$ 流量比与渗层深度的关系

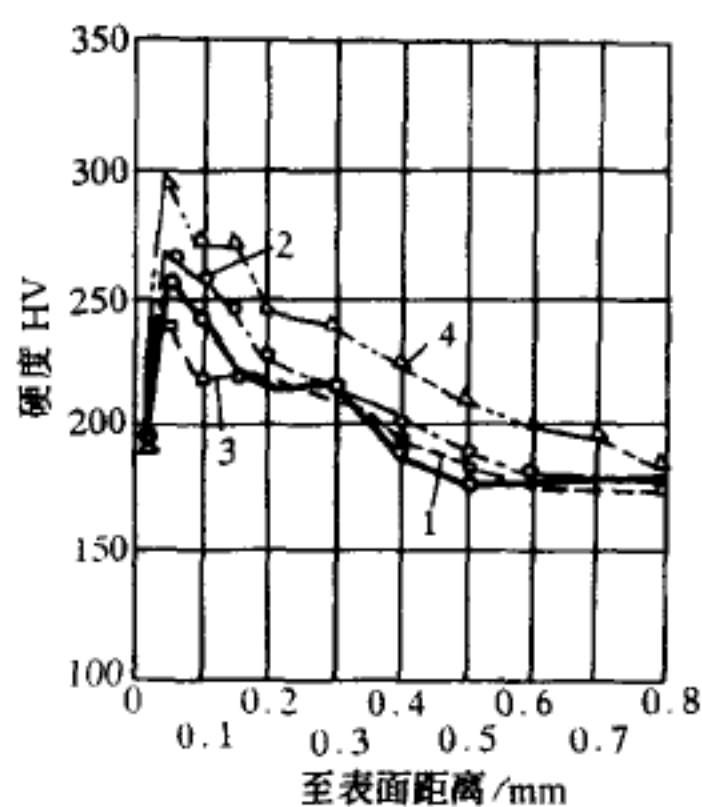


图 12-171 45 钢硫氮共渗后的硬度分布

(硫氮共渗盐浴成分: CNO^- —35%; CO_3^{2-} —25%;

Li —4%; Na —16%; K —20%; K_2S —微量)

1— $570^{\circ}\text{C} \times 1\text{h}$, 水冷 2— $570^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$, 水冷
3— $570^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$, 空冷 4— $570^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$, 水冷

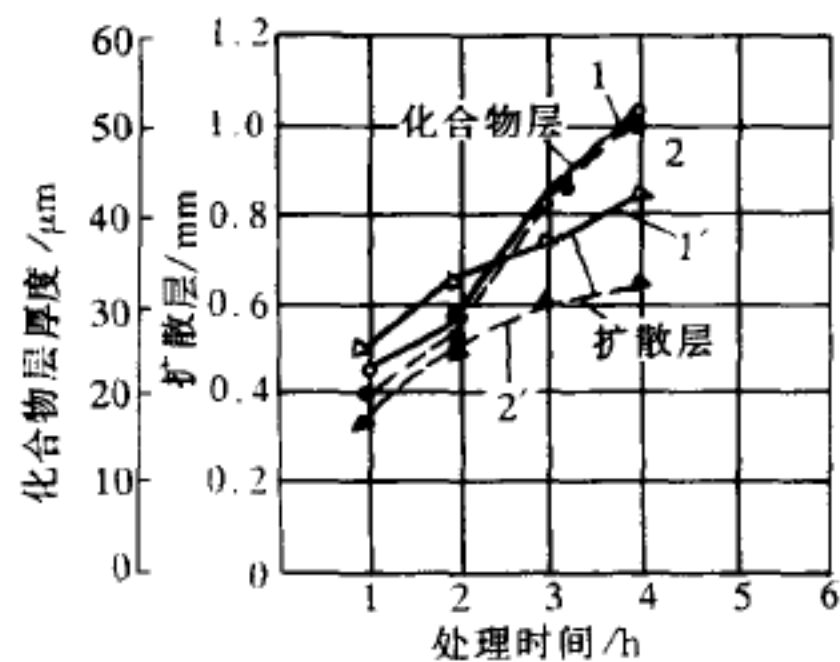


图 12-172 45 钢硫氮共渗时间与渗层厚度的关系

1, 1'—S45C 2, 2'—SCM3

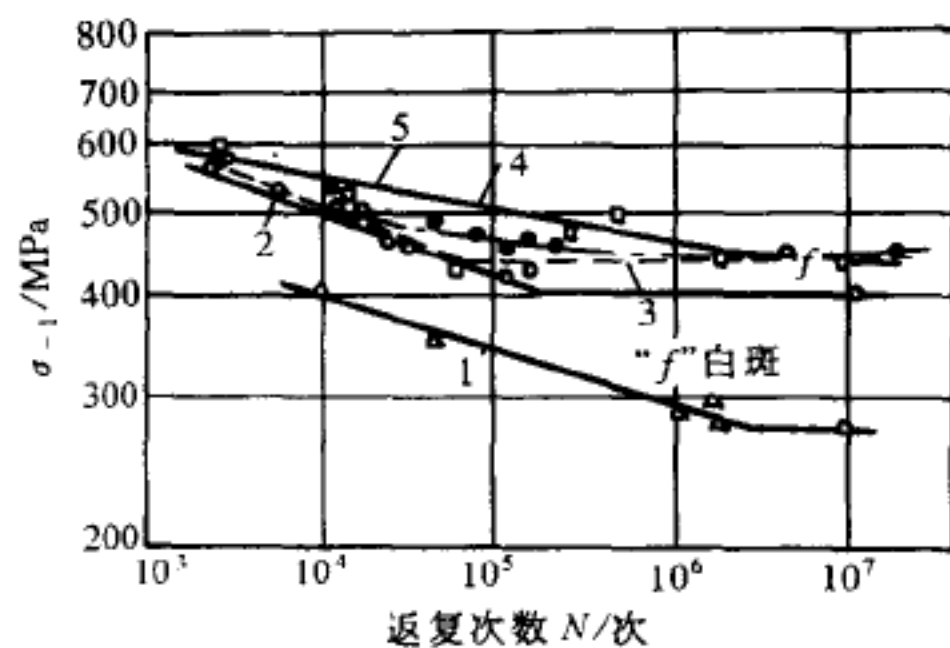


图 12-173 45 钢硫氮共渗后的疲劳曲线(水冷)

1—原材 2—硫氮共渗 $570^{\circ}\text{C} \times 1\text{h}$
3—硫氮共渗 $570^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$ 4—硫氮共渗
 $570^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$ 5—氮硫共渗 $570^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$

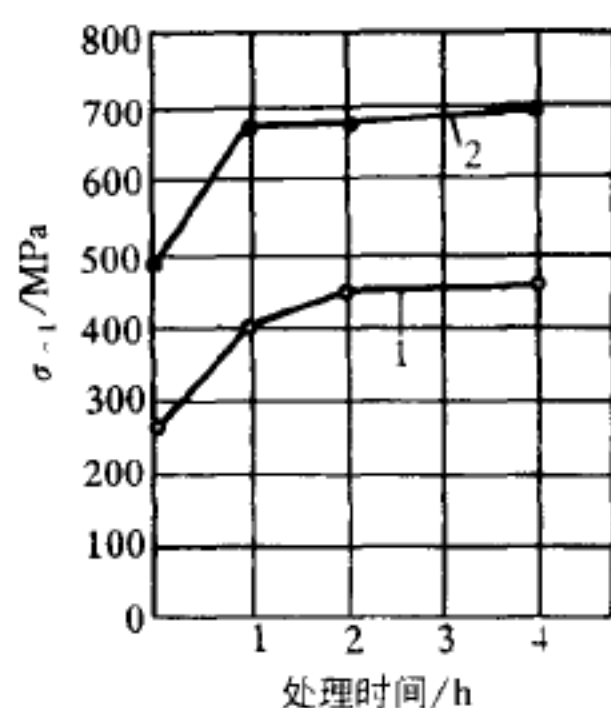


图 12-174 45 钢硫氮共渗时间与疲劳极限的关系 (水冷)
1—S45C 2—SCM3

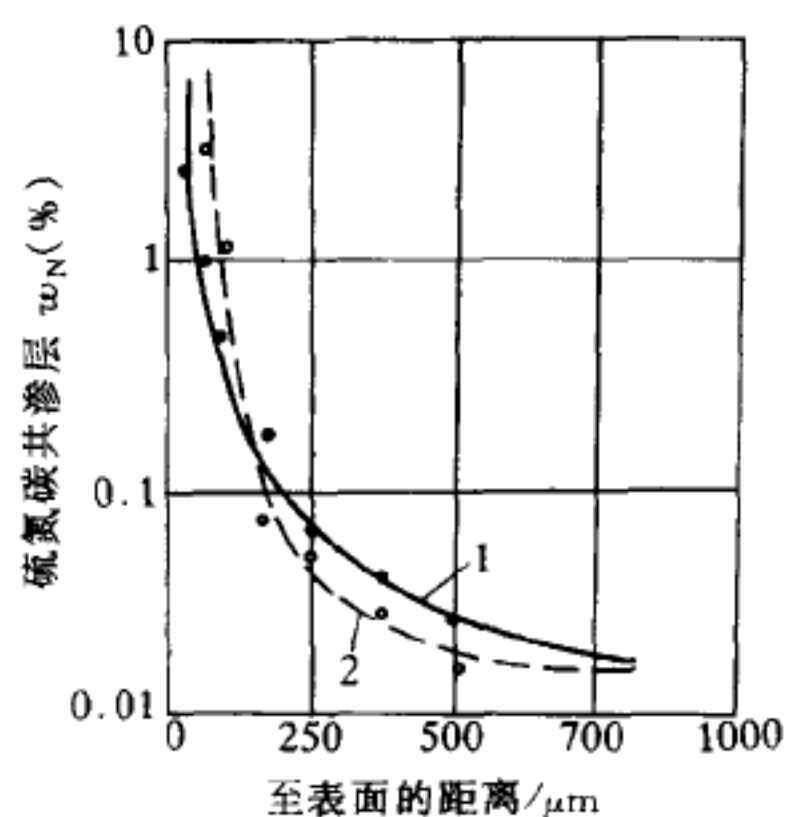


图 12-175 40 钢 35CrMo 硫氮碳共渗层氮的浓度梯度
1—40 钢 2—35CrMo

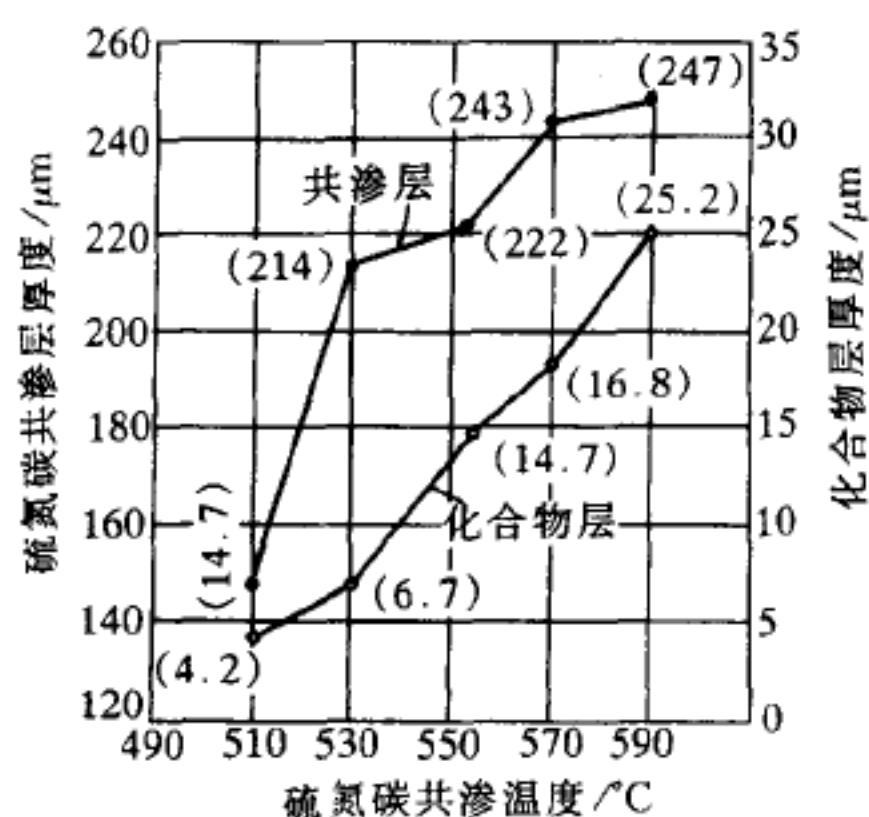


图 12-176 硫氮碳共渗温度对 35CrMoV 钢化合物层及扩散层厚度的影响
(保温 90min)

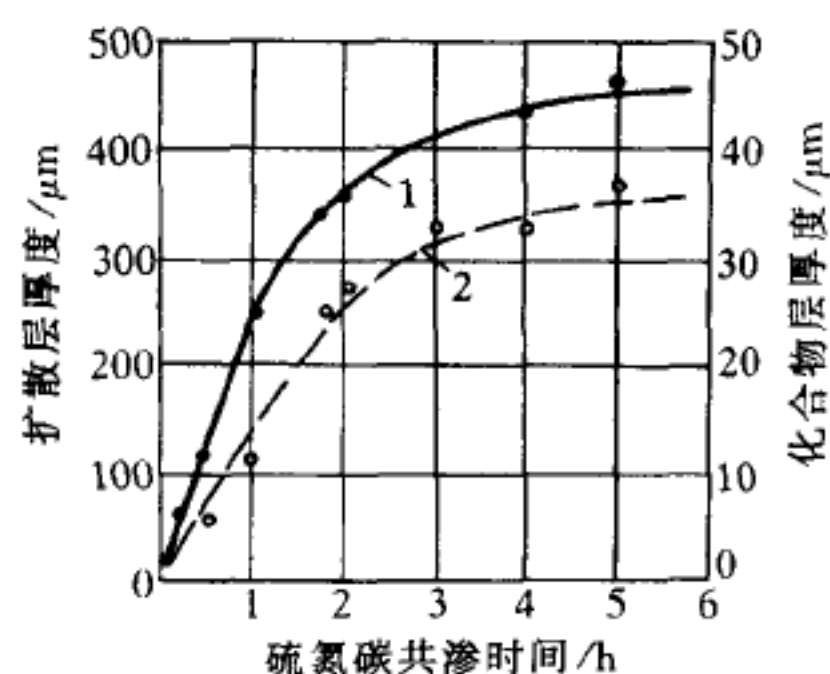


图 12-177 保温时间对 35CrMoV 钢化合物层及扩散层厚度的影响 (共渗温度 $550 \pm 10^{\circ}\text{C}$)
1—扩散层 2—化合物层

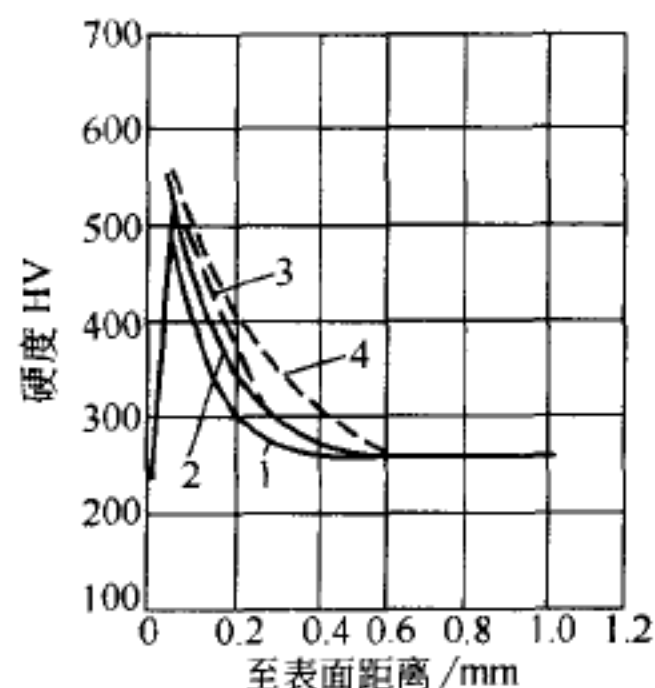


图 12-178 35CrMo 钢硫氮共渗及氮碳共渗后的硬度分布

1—硫氮共渗 570 $^{\circ}\text{C}$ x 1h 2—硫氮共渗 570 $^{\circ}\text{C}$ x 2h
3—氮碳共渗 570 $^{\circ}\text{C}$ x 2h 4—硫氮共渗 570 $^{\circ}\text{C}$ x 4h

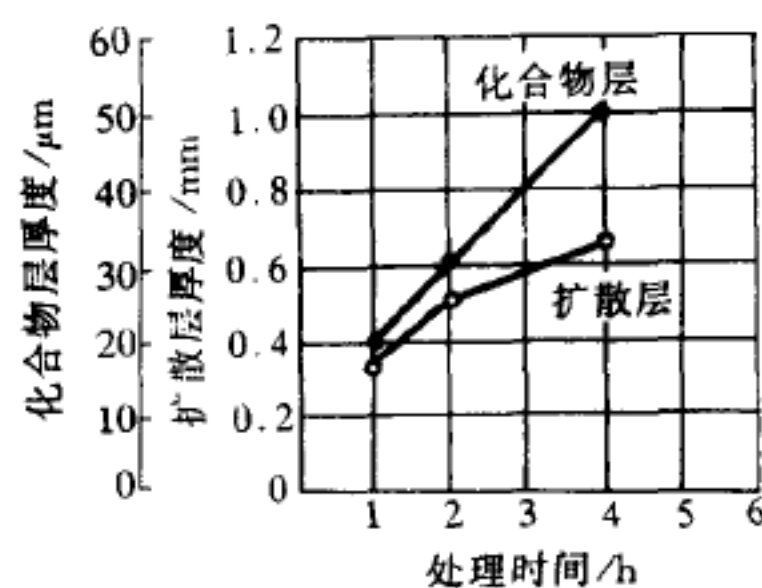


图 12-179 35CrMo 钢硫氮共渗时间对化合物层和扩散层厚度的影响

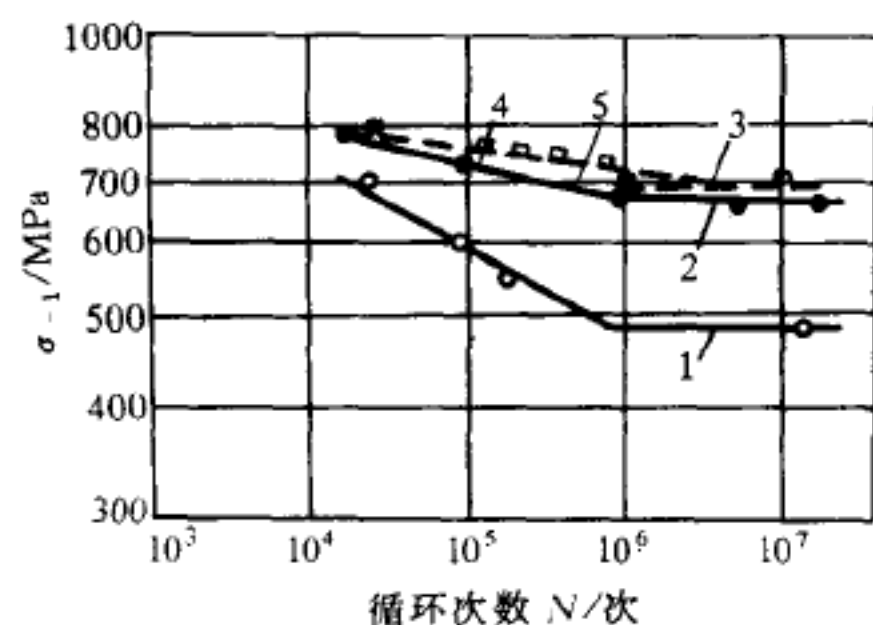
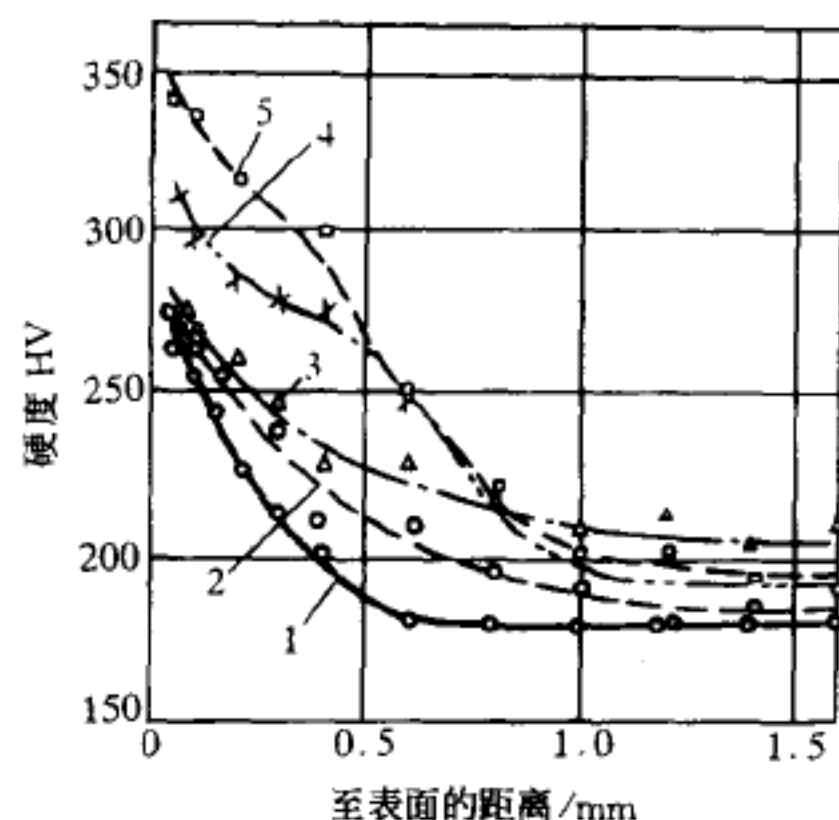


图 12-180 35CrMo 钢硫

氮共渗后的疲劳曲线

1—未处理 2—硫氮共渗 570℃ × 1h 3—硫
氮共渗 570℃ × 2h 4—硫氮共渗 570℃ × 4h
5—氮碳共渗 570℃ × 2h(均为水冷)

1— $\sigma = 0\text{MPa}$ 2— $\sigma = 380\text{MPa}$ $N = 1.08 \times 10^7$ 3— $\sigma = 440\text{MPa}$ $N = 1.03 \times 10^7$ 4— $\sigma = 460\text{MPa}$ $N = 2.57 \times 10^4$ 5— $\sigma = 530\text{MPa}$ $N = 5.80 \times 10^3$ 图 12-181 35CrMo 钢硫氮共渗疲劳试验后
的硬度变化(570℃ × 2h, 水冷)

12.7 氮碳共渗工艺及性能(表 12-177 ~ 表 12-200 和图 12-182 ~ 图 12-210)

表 12-177 氮碳共渗方法的原理、工艺和适用范围

共渗方式	工艺过程	特 点	适用范围
液体法	1. 往熔融氰盐中通入空气形成氰酸盐 $2\text{NaCN} + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{NaCNO}$, $4\text{NaCNO} \longrightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + 2\text{NaCN} + \text{CO} + 2[\text{N}]$, $2\text{CO} \longrightarrow \text{CO}_2 + [\text{C}]$, 共渗温度 560 ~ 580℃, 时间 1 ~ 3h	盐浴中控制氰酸盐含量在质量分数为 30% ~ 35%, 碳酸盐质量分数 < 30%。盐浴剧毒, 要特别注意劳动保护, 用过的废盐、废水要仔细无害化处理后才可排放。盐浴需在钛坩埚或搪瓷坩埚中熔化	曲轴、轴类、导轨、齿轮等轻载或均匀载荷的易磨损件, 高速钢、冷作模具钢的工模具
	2. 尿素加碳酸盐反应生成氰酸盐 $2(\text{NH}_2)_2\text{CO} + \text{Na}_2\text{CO}_3 \longrightarrow 2\text{NaCNO} + 2\text{NH}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$, 其余反应同上。共渗温度 560 ~ 580℃, 时间 1 ~ 3h	原料无毒, 反应产物仍有毒, 其余同上	
气体法	1. 在吸热式气/ $\text{NH}_3 = 1$ 的炉气中于 570℃ 渗 1 ~ 3h 2. 在乙醇 + NH_3 裂解气中于 570℃ 渗 1 ~ 3h 3. 在投放尿素的裂解气氛中于 570℃ 渗 1 ~ 3h 4. 在放热式气/ $\text{NH}_3 \approx 2$ 的炉气中于 570℃ 渗 1 ~ 3h	反应产物中有 HCN, 气体在井式炉排气孔处点燃, 可使其降至允许程度以下	
	5. 在 NH_3 气中加入体积分数为 1% ~ 2% 的 O_2 (或体积分数为 5% 的空气) 于 570℃ 渗 1 ~ 3h	反应产物无毒, 渗速大, 可获得氧氮碳共渗效果, 化合物层有孔隙, 便于润滑减摩	

表 12-178 气体氮碳共渗的技术要求

材 料	处理前状况	表面硬度 HV0.1	化合物层深度/mm	扩散层深度/mm
08		≥ 500	10 ~ 15	0.10 ~ 0.80
45	调质	≥ 550	10 ~ 20	0.30 ~ 0.50
40Cr	调质	≥ 650	7 ~ 15	0.15 ~ 0.20
50Mn	调质	≥ 550	10 ~ 15	0.30 ~ 0.50
38CrMoAl	调质 26 ~ 32HRC	≥ 900	10 ~ 15	0.10 ~ 0.20
25Cr2MoV	二次硬化 58 ~ 62HRC	≥ 850	6 ~ 10	0.05 ~ 0.15
W18Cr4V	62 ~ 64HRC	≥ 900	3 ~ 10	0.03 ~ 0.05
QT600—3		≥ 650	5 ~ 12	0.10 ~ 0.20
3Cr2W8V	调质 28 ~ 32HRC 淬火 42 ~ 46HRC	≥ 750	5 ~ 12	0.05 ~ 0.20

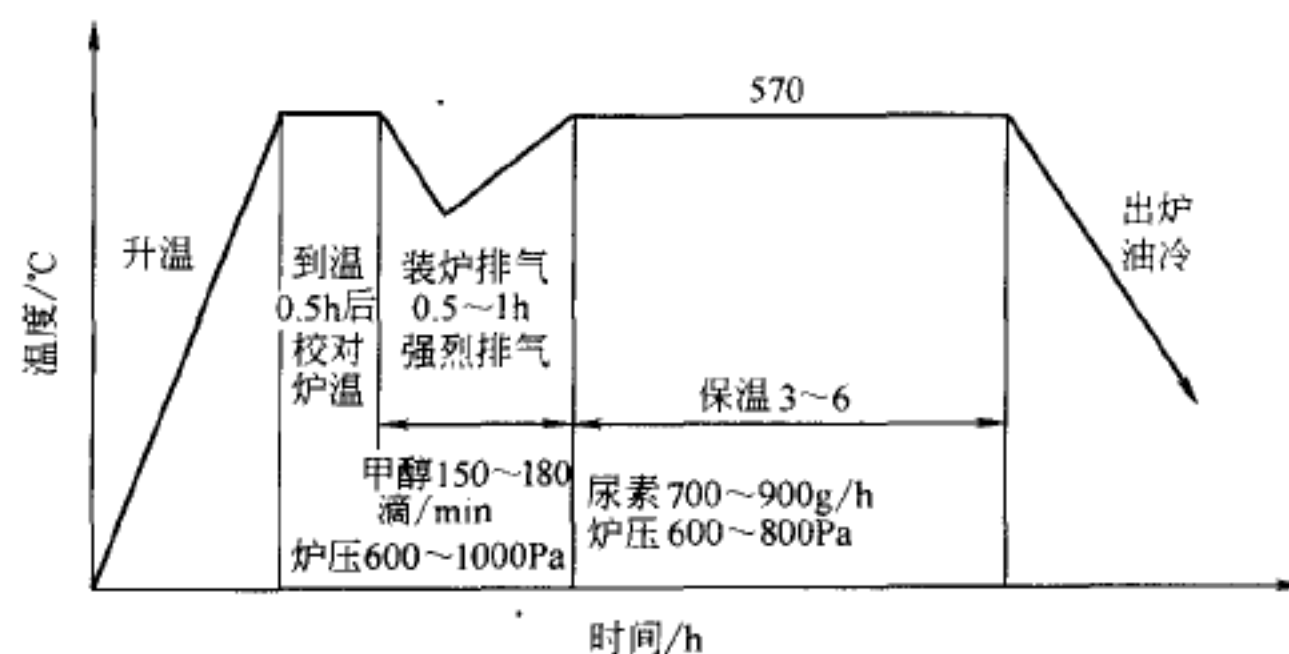


图 12-182 球墨铸铁曲轴氮碳共渗工艺

表 12-179 几种气体氮碳共渗剂

类 别	渗剂成分(质量分数)(%)	备 注
吸热式可控气氛(R_g)与氨为介质	NH_3 50, R_g 气 50, (R_g 气含 H_2 32 ~ 40, CO 20 ~ 24, $CO_2 \leq 1$, N_2 38 ~ 43)	废气中剧毒的 HCN 可高达 620×10^{-6} , 排气口点燃也不可能达到 $0.3mg/m^3$ 的排放标准
放热式可控气氛(N_g)与氨为介质	NH_3 50 ~ 60, N_g 气 40 ~ 50 (N_g 气含 $CO_2 \leq 10$, $CO < 5$, $H_2 < 1$, N_2 余量, $> 85\%$)	排气口 HCN 含量为 20×10^{-6} (约 $3mg/m^3$)。 N_g 气的成本约为 R_g 气的 70%
放热—吸热式气氛与氨为介质	NH_3 50, $N_g - R_g$ 气 50, ($N_g - R_g$ 的成分约为 H_2 20, CO 20 及 N_2 60)	
氨与烷类气体为介质	NH_3 50 ~ 60, C_3H_8 40 ~ 50, 或以 CH_4 代 C_3H_8	
氨与醇为介质	$NH_3 + C_2H_5OH$	以 CH_3OH 代 C_2H_5OH 则 NH_3 流量酌减
尿素为介质	$(NH_2)_2CO$ 100 $(NH_2)_2CO \rightarrow CO + 2H_2 + 2[N]$	通过螺杆式送粉器将尿素加入炉罐中
放热气氛与氨为介质, 加前处理	NH_3 50 ~ 60, N_g 气 40 ~ 50, 氮碳共渗前先在 $350^\circ C$ 左右预氧化	预热在空气炉中进行, 可减小变形, 形成的氧化膜有助于提高共渗速率
放热气氛与氨为介质, 加后处理	NH_3 50 ~ 60, N_g 气 40 ~ 50 共渗后在 $300 \sim 400^\circ C$ 氧化	耐蚀性明显提高
以氨, 二氧化碳为介质, 添加或不加氮气	NH_3 40 ~ 95, CO_2 5 + N_2 0 ~ 55	添加氮气有助于提高氮势和碳势

表 12-180 保温时间对渗层深度与表面硬度的影响

钢 号	共 渗 层特 性	570℃保温 时间	2h			4h		
			硬度 HV	化合物层厚度 / μm	扩散层厚度 /mm	硬度 HV	化合物层 厚度/ μm	扩散层厚度 /mm
20 钢			480	10	0.55	500	18	0.80
15CrMo			600	8	0.30	650	12	0.45
45 钢			550	13	0.40	600	20	0.45
40CrMo			750	8	0.35	860	12	0.45
T10			620	11	0.35	680	15	0.35

表 12-181 Rx 气露点对氮碳共渗层深度与硬度的影响

钢 种	露点/℃	8 ~ 10			- 2 ~ 2			- 8 ~ 10		
		硬度 HV	化合物 层深度 / μm	扩散层 深度 /mm	硬度 HV	化合物 层深度 / μm	扩散层 深度 /mm	硬度 HV	化合物 层深度 / μm	扩散层 深度 /mm
45 钢		508	20	0.65	540	20	0.50	600	20	0.45
40CrMo		657	15	0.55	720	14	0.50	865	12	0.45
15CrMo		542	18	0.50	580	14	0.50	650	10	0.45

表 12-182 在不同温度保温 1.5h 氮碳共渗层深度

钢 种	温度/℃	540 ± 5		560 ± 5		580 ± 5		590 ± 5	
		化合物 层深度 / μm	总渗层 深度 /mm	化合物 层深度 / μm	总渗层 深度 /mm	化合物 层深度 / μm	总渗层 深度 /mm	化合物 层深度 / μm	总渗层 深度 /mm
20 钢		9	350	12	450	14	580	16	670
40CrNi		6	220	8	300	10	390	11	420

表 12-183 几种常用结构钢氮碳共渗^①效果

钢 号	表面硬度		渗层深度/mm	
	HV	HRC(换算值)	化合物层	扩散层
纯铁	600 ~ 750	55 ~ 62	0.007 ~ 0.020	0.30 ~ 0.70
10 钢	550 ~ 700	52 ~ 60	0.007 ~ 0.015	0.20 ~ 0.40
20 钢	550 ~ 700	52 ~ 60	0.007 ~ 0.015	0.20 ~ 0.40
45 钢	550 ~ 700	52 ~ 60	0.007 ~ 0.015	0.15 ~ 0.30
20Cr	650 ~ 800	57 ~ 64	0.005 ~ 0.012	0.10 ~ 0.25
40Cr	650 ~ 800	57 ~ 64	0.005 ~ 0.012	0.10 ~ 0.25
35CrMo	650 ~ 800	57 ~ 64	0.005 ~ 0.012	0.10 ~ 0.20
50CrMo	650 ~ 800	57 ~ 64	0.005 ~ 0.012	0.10 ~ 0.20
38CrMoAl	900 ~ 1000	> 67	0.005 ~ 0.012	0.10 ~ 0.20

① 均为尿素氮碳共渗,氮碳共渗温度 570℃,时间 3h,油冷,尿素加入量 650 ~ 900g/h。

表 12-184 70% 甲酰胺 + 30% 尿素氮碳共渗效果

材 料	温度/℃	共渗层深度/mm		渗层硬度 HV0.05	
		化合物层	扩 散 层	化合物层	扩 散 层
45	570 ± 10	0.010 ~ 0.025	0.244 ~ 0.379	450 ~ 650	412 ~ 580
40Cr	570 ± 10	0.004 ~ 0.010	0.120	500 ~ 600	532 ~ 644
灰铸铁	570 ± 10	0.003 ~ 0.005	0.100	530 ~ 750	508 ~ 795
Cr12MoV	540 ± 10	0.003 ~ 0.006	0.165	927	752 ~ 795
3CrW8V	580	0.003 ~ 0.011	0.066 ~ 0.120	846 ~ 1100	657 ~ 1114
3Cr2W8V	600	0.008 ~ 0.012	0.099 ~ 0.117	840	761 ~ 1200
3Cr2W8V	620	—	0.100 ~ 0.150	—	762 ~ 891
W18Cr4V	570 ± 10	—	0.090	—	1200
T10	570 ± 10	0.006 ~ 0.008	0.129	677 ~ 946	429 ~ 466
20CrMo	570 ± 10	0.004 ~ 0.006	0.079	672 ~ 713	500 ~ 700

表 12-185 常用钢种的气体氮碳共渗效果

钢 种	扩 散 层	
	深度/mm	显微硬度 HV
4Cr5MoSiV1	0.25 ~ 0.30	860 ~ 635
4Cr5MoSiV	0.25 ~ 0.30	860 ~ 830
4Cr5W2VSi	0.25	765 ~ 660
5Cr2MoNiV	0.25	825 ~ 600
4Cr4Mo2WVSi	0.18 ~ 0.20	980 ~ 680
4Cr2W2MoVSi	0.18 ~ 0.25	1350 ~ 680

表 12-186 几种结构钢的加氧渗氮及酒精加氮氮碳共渗效果^①

钢号	化合物层厚度/μm		扩散层深度/mm		表面硬度/HV	
	氧 + 氮 ^②	酒精 + 氮 ^③	氧 + 氮	酒精 + 氮	氧 + 氮	酒精 + 氮
08 钢	15 ~ 25	12 ~ 20	0.45 ~ 0.55	0.3 ~ 0.6	647 ~ 795	637 ~ 752
20 钢	15 ~ 20	12 ~ 15	0.3 ~ 0.5	0.2 ~ 0.4	685 ~ 893	634 ~ 724
45 钢	25 ~ 35	10 ~ 12	0.3 ~ 0.45	0.2 ~ 0.4	789 ~ 863	562 ~ 685
20Cr	10 ~ 15	7 ~ 12	0.2 ~ 0.3	0.15 ~ 0.25	752 ~ 839	711 ~ 789
40Cr	16 ~ 24	7 ~ 15	0.2 ~ 0.3	0.15 ~ 0.25	789 ~ 940	711 ~ 772
65Mn	15 ~ 20	7 ~ 10	0.15 ~ 0.2	0.1 ~ 0.2	839 ~ 863	685 ~ 752
12Cr2Ni4A	8 ~ 15	12 ~ 15	0.2 ~ 0.3	0.2 ~ 0.3	716 ~ 795	752
38CrMoAl	15 ~ 16	7 ~ 12	0.2 ~ 0.3	0.1 ~ 0.2	839 ~ 1060	888 ~ 940

① 工艺规范均为 570℃ × 3h, 油冷。

② 加氧渗氮的气体成分是 NH₃100% + O₂0.5%。③ 酒精 + 氮软氮化为酒精 50% + NH₃50%。

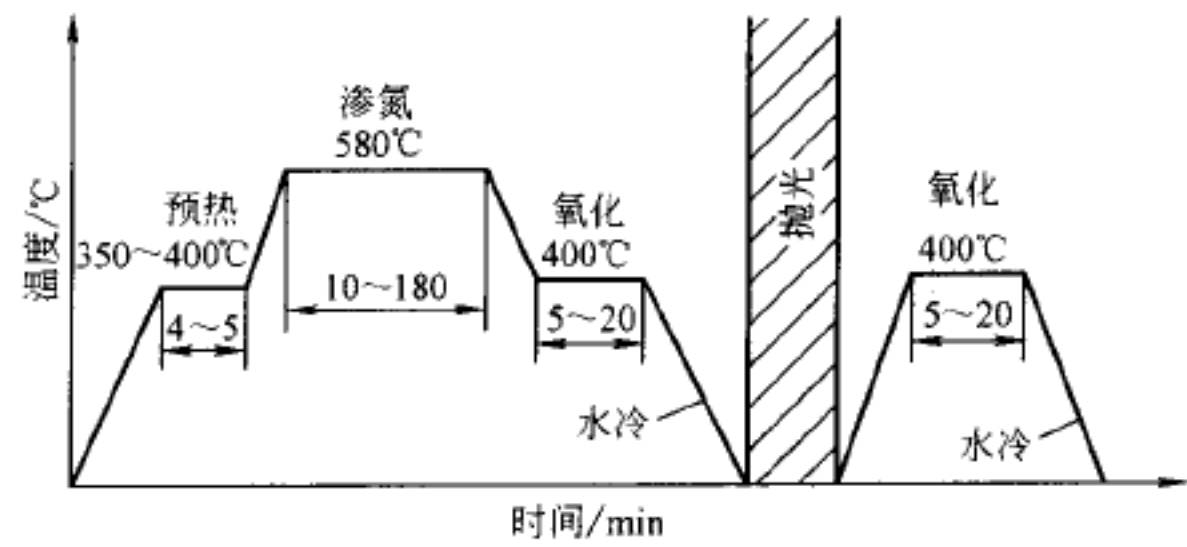


图 12-183 QPQ 盐浴复合处理的工艺曲线

表 12-187 典型的氮碳共渗熔盐成分

盐浴配方或盐浴商品名称	获得 CNO ⁻ 的方法或化学方程式	备 注
TF—1 基盐(工作用盐或称共渗用盐), REG—1 再生盐(调整成分用)	用碳酸盐, 尿素等化工原料合成 TF—1, 商品盐中含 CNO ⁻ 47~49, REG—1 系有机合成物(C ₆ N ₉ H ₅)	使用过程中 CN ⁻ ≤ 3, 系低氰浴。新盐应空载陈化至 CNO ⁻ ≤ 40 再用。共渗后在 AB1 氧化浴冷却可实现无污染作业。CNO ⁻ 可控制在最佳值 ± 1~2, 强化效果稳定
J—2 等(国产基盐) Z—1(国产再生盐)	用多种碳酸盐及尿素等原料合成 J—2, CNO ⁻ ≈ 40~42 Z—1 系有机缩合物为主的再生盐	使用过程中 CN ⁻ 低于 TF—1 浴产生的 CN ⁻ , 系优质低氰浴。共渗后在国产的 Y—1 氧化浴中冷却, 可实现无污染作业。CNO ⁻ 可控制在最佳值 ± 1~2, 强化效果稳定
(NH ₂) ₂ CO40, Na ₂ CO ₃ 30, K ₂ CO ₃ 20, KOH10	通过碳酸盐与尿素反应生成氰酸盐, 例如 $2(\text{NH}_2)_2\text{CO} + \text{Na}_2\text{CO}_3 = 2\text{NaCNO} + 2\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$	原料无毒, 但氰酸盐分解与氧化都生成氰化物。使用过程中, CN ⁻ 不断增多, 成为 CN ⁻ ≥ 10 的中氰浴。国内用户在 CNO ⁻ = 18~45 的范围内使用, 成分波动大, 强化效果不稳定, 盐浴中 CH ⁻ 无法降低, 不符合环保要求
(NH ₂) ₂ CO37.5, KCl37.5, Na ₂ CO ₃ 25		
NS—1 盐 85 (KCNO40, NaCN60), Na ₂ CO ₃ 15 为基盐, 用 NS—2 (NaCN75, KCN25) 为再生盐	通过氧化, 使 2CN ⁻ + O ₂ → 2CNO 工作时的成分为 (KCNO + NaCNO) 占 42~48; (KCN + NaCN) 约 50%, CO ₃ ²⁻ 2~8	不断通入空气, CN ⁻ 含量高达 20~25, 但成分及处理效果较稳定。必须有废盐, 废渣与废水消毒设备方可采用
(NH ₂) ₂ CO34, K ₂ CO ₃ 23, NaCN43	NaCN 氧化与碳酸钾和尿素反应合成	氰根仍不低于 25, 属高氰盐浴, 成分较稳定, 但必须有全套中和消毒设备方可采用

注: 成分含量皆指质量分数(%)。

表 12-188 熔盐氮碳共渗后的冷却方法及其影响

冷却介质	主要特点	对共渗层性能的影响
空气	冷却速度较小, 在沸水中洗净盐渍的时间需 10~30min	尺寸变化很小, 疲劳强度略有提高, 约相当于水冷的 90%
油	冷却速度较大, 在沸水中洗净残盐的时间约需 30~60min	尺寸变化小, 疲劳强度提高幅度, 约为水冷时的 90%~95%
水	冷却速度大, 在沸水中洗净盐渍的时间仅需 3~10min	尺寸变化稍大, 疲劳强度高
AB1(又名 KQ500) 或 Y—1 盐	冷却速度较大, 氧化浴等温 5~20min 后 CN ⁻ 为零, CNO ⁻ 少许, 洗去氧化盐约需 5~15min	尺寸变化小, 疲劳强度约为水冷件的 95%~98%, 防锈蚀力优良

表 12-189 常用材料的盐浴氮碳共渗处理规范及渗层

材料种类	代表牌号	前处理	渗氮温度/℃	渗氮时间/h	表面硬度 HV	化合物层厚度 / μm
纯铁		—	570	2~4	500~650	15~20
低碳钢	Q235-B、20、20Cr	—	570	2~4	500~700	15~20
中碳钢	45、40Cr	不处理或调质	570	2~4	500~700	12~20
高碳钢	T8、T10、T12	不处理或调质	570	2~4	500~700	12~20
渗氮钢	38CrMoAl	调质	570	3~5	900~1000	9~15
铸模钢	3Cr2W8V	淬火	570	2~3	900~1000	6~10
热模钢	5CrMnMo	淬火	570	2~3	770~900	9~15
冷模钢	Cr12MoV	高温淬火	520	2~3	900~1000	6~15
高速钢	W6Mo5Cr4V2(刀具)	淬火	550	5/60~45/60	1000~1200	—
高速钢	W6Mo5Cr4V2(耐磨件)	淬火	570	2~3	1200~1500	6~8
不锈钢	1Cr13、4Cr13	—	570	2~3	900~1000	6~10
不锈钢	1Cr18Ni9Ti	—	570	2~3	950~1100	6~10
不锈钢	0Cr18Ni12Mo2Ti	—	570	2~3	950~1100	总深:20~25
气门钢	5Cr21Mn9Ni4N	固溶	570	2~3	900~1100	3~8
灰铸铁	HT200	—	570	2~3	500~600	总深:0.1mm
球墨铸铁	QT500—7	—	570	2~3	500~600	总深:0.1mm

表 12-190 刀具盐浴碳氮共渗时间参考表

刀具种类	刀具规格	碳氮共渗时间/min
钻头	$< \phi 1$	5~15
	$\phi 1 \sim 5$	15~25
	$\phi 5 \sim 30$	25~35
	$> \phi 30$	35~45
立铣刀	$< \phi 5$	20~25
铰刀	$\phi 5 \sim 10$	25~30
	$> \phi 10$	30~35
	$< M5$	5~10
丝锥	M5~10	10~15
	$> M10$	15~25
	$< \phi 20$	25~30
拉刀	$> \phi 20$	30~45
圆柱铣刀、滚刀 插齿刀、剃齿刀	中等规格	30~45

表 12-191 结构钢电解气相氮碳共渗效果

钢号	工 艺 规 范				渗氮层深度 /mm	表面硬度 HV	脆性级别
	阶段	温度/℃	时间/h	氮分解率(%)			
38CrMoAl		560	12	45 ~ 50	0.38	1003 ~ 1018	I
	I	530	6	25 ~ 30	0.38	1097	II
	II	580	6	45 ~ 55			
25Cr2MoV		560	12	45 ~ 50	0.35	723 ~ 743	I
	I	530	6	25 ~ 30	0.45	689	I
	II	580	6	45 ~ 55			
30Cr2MoV		560	12	45 ~ 50	0.40	704 ~ 724	I
35CrMo		560	12	45 ~ 50	0.32	649 ~ 673	I ~ II
42CrMo	I	540	5	15	0.5 ~ 0.6	550 ~ 580	I ~ II
	II	580	7	35			
40Cr	I	525	4	24	0.45	620 ~ 650	I
	II	560	6	42			
20CrMnTi	I	540	15	30	0.8 ~ 0.9 (加 560℃ × 3h 退 N)	655	I
	II	560	20	50			
18Cr2Ni4W					0.02(化合层)	874	

表 12-192 在氰化物—氰酸盐浴中的渗氮规范

盐浴 编号	过程的名称	盐浴的成分(%)		盐浴稳定工 作的温度 /℃	再生混合 物的成分 (%)
		装料时	工作时		
1	“Tenifer” (德国德古沙公司)	85NSI 盐 (KCNO40 和 NaCN60), Na ₂ CO ₃ 15, Na ₂ CN ₂ 1	1.KCNO 和 NaCN042 ~ 48, KCN 和 NaCN50 + 苏打(余量) ^①	570	NS2 盐(75NaCN + 25KCN)
2	“Tenifer” (德国德古沙公司)	—	2. NaCN38 ~ 42, KCNO43 ~ 47, Na ₂ CO ₃ 2 ~ 6, K ₂ CO ₃ 10 ~ 14	560 ~ 575	44 ~ 49KCN 或 41 ~ 56NaCN
3	“Tafrinding” (美国)	碱金属氰酸盐 25 ~ 40	1. NaCN6 ~ 18, NaCNO30 ~ 42, 氯化物(余量)	570	—
4	“Tafrinding” (美国)	碱金属氰酸盐 ≥ 50; 其余为碳酸盐	2. NaCN45, KCNO32, Na ₂ CO ₃ 23 ^②	500 ~ 600	—
5	液体渗氮 (俄罗斯) ^③	—	NaCN44 ~ 46, KCNO42 ~ 45, Na ₂ CO ₃ (余量)	500 ~ 600	—

注:成分均指质量分数。
① 时效的持续时间 ≥ 48h(通常在 570℃时,70 ~ 80h,并用空气鼓吹);
② 盐浴用空气鼓吹;
③ 坩埚用钛制造,盐浴用空气鼓吹。

表 12-193 工具钢在“Tenifer”盐浴中液体氮碳共渗规范

钢 号	处理规范		渗层厚度 /mm	HV	钢的用途
	t/℃	τ/h			
W18Cr4V	560 ~ 580	5 ~ 15	0.03 ~ 0.06	1250 ~ 1400	切削工具
W6Mo5Cr4V2	560 ~ 580	30 ~ 60	0.06 ~ 0.09	1350 ~ 1400	切削工具
3Cr2W8V	560	120 ~ 180	0.1 ~ 0.15	1185 ~ 1260	压模和锻模
4Cr4Mo2WVS	580 ~ 600	60 ~ 120	0.1 ~ 0.15	1150 ~ 1310	压模和锻模

(续)

钢 号	处理规范		渗层厚度 /mm	HV	钢的用途
	$t/^{\circ}\text{C}$	τ/h			
Cr12Mo	540	120 ~ 180	0.08 ~ 0.10	1100 ~ 1115	压模和锻模
	560	60 ~ 120	0.08 ~ 0.10	1075 ~ 1110	压模和锻模

表 12-194 熔盐氮碳共渗层的深度与表面(层)显微硬度

钢铁牌号	前处理工艺	化合物层深度/ μm	主扩散层深度/ μm	表面(层)显微硬度
20 钢	正 火	12 ~ 18	0.30 ~ 0.45	450 ~ 500HV0.1
45 钢	调 质	10 ~ 17	0.30 ~ 0.40	500 ~ 550HV0.1
20Cr	调 质	10 ~ 15	0.15 ~ 0.25	600 ~ 650HV0.1
38CrMoAl	调 质	8 ~ 14	0.15 ~ 0.25	950 ~ 1100HV0.2
30Cr3W	调 质	10 ~ 14	0.15 ~ 0.25	950 ~ 1100HV0.1
3Cr13	调 质	8 ~ 12	0.08 ~ 0.15	900 ~ 1100HV0.2
1Cr18Ni9Ti	固溶处理	8 ~ 14	0.06 ~ 0.10	1049HV0.05
4Cr14Ni14W2Mo	固溶处理	10	0.06	770HV1.0
20CrMnTi	调 质	8 ~ 12	0.10 ~ 0.20	600 ~ 620HV0.05
T8A	退 火	10 ~ 15	0.20 ~ 0.30	600 ~ 800HV0.1
CrWMn	退 火	8 ~ 10	0.10 ~ 0.20	650 ~ 850HV0.1
3Cr2W8V	调 质	6 ~ 10	0.10 ~ 0.15	850 ~ 1000HV0.2
W18Cr4V	淬火,回火 2 次	0 ~ 2	0.025 ~ 0.040	1000 ~ 1150HV0.2
HT250	退 火	10 ~ 15	0.18 ~ 0.25	600 ~ 650HV0.2

注:除 4Cr14Ni14W2Mo 及 W18Cr4V 外,各钢种与铸铁皆在 $565^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 共渗 1.5 ~ 2h; 4Cr14Ni14W2Mo 处理 3h; W18Cr4V 于 $550^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 共渗 20 ~ 30min。

表 12-195 常用固体氮碳共渗渗剂配方及特点

序 号	渗剂配方(质量分数)(%)	主 要 特 点
1	木炭 40 ~ 50, 骨粉 20 ~ 30, 碳酸钡 15 ~ 20, 黄血盐 15 ~ 20	木炭及骨粉供给碳; 黄血盐及碳酸钡在加热时分解, 供给碳、氮原子, 并有催渗作用
2	木炭 50 ~ 60, 碳酸钠 10 ~ 15, 氯化铵 3 ~ 7, 黄血盐 25 ~ 35	活性较持久, 适用于共渗层较厚 ($> 0.3\text{mm}$) 的工件
3	尿素 25 ~ 35, 多孔陶瓷(或蛭石片) 25 ~ 30, 硅砂 20 ~ 30, 混合稀土 1 ~ 2, 氯化铵 3 ~ 7	尿素的 50% ~ 60% 与硅砂拌匀, 其余溶于水并用多孔陶瓷或蛭石吸附后于 150°C 以下烘干再用。此法适于共渗层厚度 $\leq 0.2\text{mm}$ 的工件

表 12-196 部分材料常用离子氮碳共渗层深度及硬度

材 料	心部硬度 HBW	化合物层深度/mm	总渗层深度/mm	表面硬度 HV
15	≈ 140	7.5 ~ 10.5	0.4	400 ~ 500
45	≈ 150	10 ~ 15	0.4	600 ~ 700
60	≈ 30HRC	8 ~ 12	0.4	600 ~ 700
15CrMn	≈ 180	8 ~ 11	0.4	600 ~ 700
35CrMo	220 ~ 300	12 ~ 18	0.4 ~ 0.5	650 ~ 750
42CrMo	240 ~ 320	12 ~ 18	0.4 ~ 0.5	700 ~ 800
40Cr	240 ~ 300	10 ~ 13	0.4 ~ 0.5	600 ~ 700
3Cr2W8V	40 ~ 50HRC	6 ~ 8	0.2 ~ 0.3	1000 ~ 1200
4Cr5MoSiV1	40 ~ 51HRC	6 ~ 8	0.2 ~ 0.3	1000 ~ 1200
4Cr14Ni14W2Mo	250 ~ 270	4 ~ 6	0.08 ~ 0.12	800 ~ 1200
QT600—3	240 ~ 350	5 ~ 10	0.1 ~ 0.2	550 ~ 800HV0.1
HT250	≈ 200	10 ~ 15	0.1 ~ 0.15	500 ~ 700HV0.1

表 12-197 常见氮碳共渗缺陷的产生原因、防止措施与补救方法

缺 陷	产 生 原 因	防止措施及补救方法
化合物层极薄扩散层较厚	CNO ⁻ 含量低, 温度偏低, 时间短	加 Z—1 或 REG—1, 校准温度, 酌情提高温度, 适当延长时间
氰酸根下降过快	浴温高或发生超温事故, 未捞渣	增加超温报警装置, 适当降温捞渣
氰根含量高, TF—1 中 CN ⁻ > 3%, J—2 浴中 CN ⁻ > 2%	未通气或通空气量太小	增大通气量
表面疏松严重甚至起皮	CNO ⁻ 含量太高	空载陈化至 CNC ⁻ ≤ 38%
花斑	入炉前有大片油渍或锈斑, 浴中渣量多, 零件紧叠	去锈, 脱脂, 捞渣, 零件间留有 > 0.5mm 的空隙
锈蚀	共渗件油冷, 残盐未洗净, 不通孔, 狭缝处有盐渍	延长开水煮洗时间, 采用 Y—1 或 AB1 氧化浴冷却
调整成分时氮臭	有 NH ₃ , CO ₂ , H ₂ O 逸出	开动抽风装置

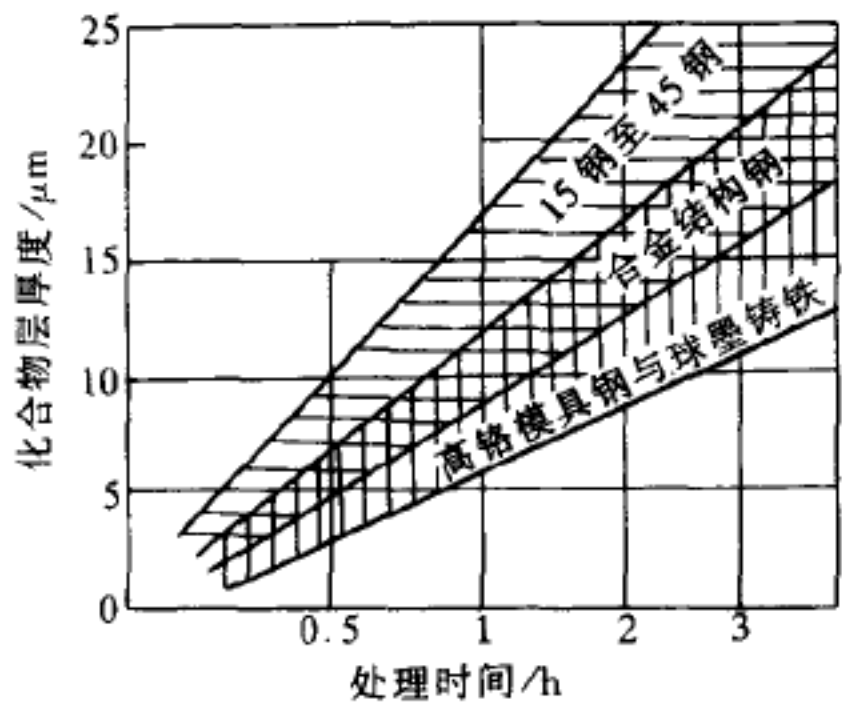


图 12-184 不同材料的试件于 580℃ 处理后化合物层厚度与处理时间的关系

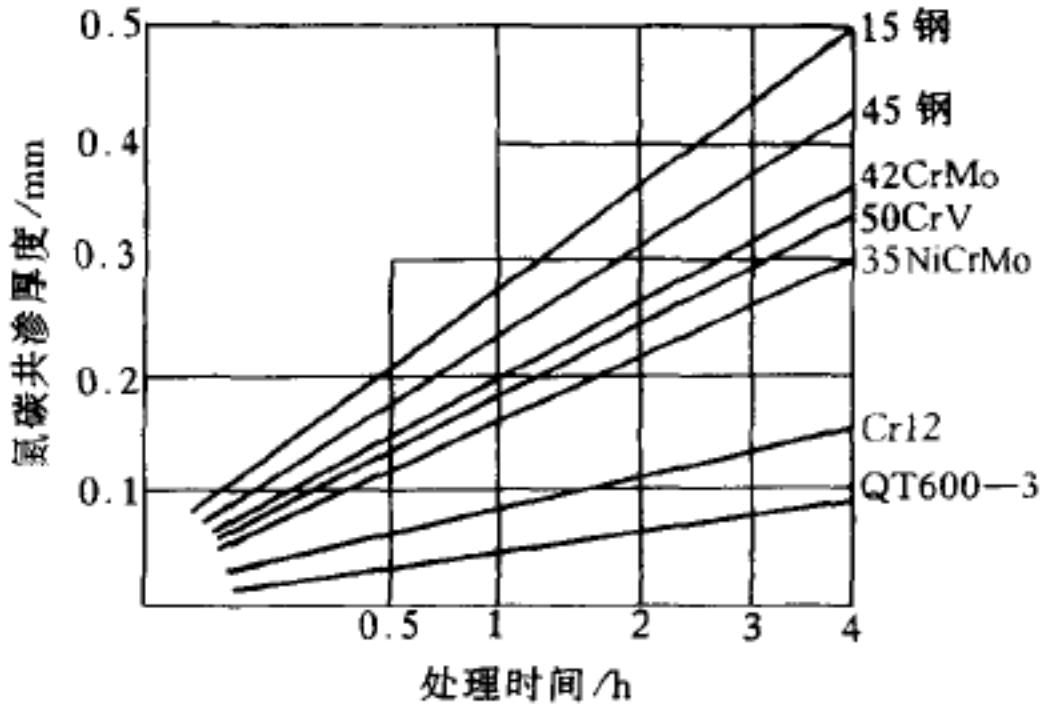


图 12-185 不同材料的试件于 580℃ 处理后共渗层总厚度与处理时间的关系

表 12-198 T10 钢不同工艺氮碳共渗(渗氮)后的结果

工 艺 规 范	工 艺	化合层厚度 / μm	扩散层厚度 /mm	表面硬度 HV
氧氮氮碳共渗	$570^{\circ}\text{C} \times 3\text{h}$	18 ~ 20	0.20 ~ 0.30	289
氨 + 酒精氮碳共渗	$570^{\circ}\text{C} \times 3\text{h}$	7 ~ 10	0.15 ~ 0.30	537 ~ 562
甲酰胺 + 30% 尿素氮碳共渗	$570^{\circ}\text{C} \times 3\text{h}$	6 ~ 8	0.129	677 ~ 946
电解气相催渗氮碳共渗	$570^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$	20 ~ 22	0.30 ~ 0.35	840 ~ 890
离子渗氮	$570^{\circ}\text{C} \times 10\text{h}$	3	0.25	700

表 12-199 7Mn15Cr2Al3V2WMo 钢的气体氮碳共渗工艺规范

渗氮温度/ $^{\circ}\text{C}$	渗氮时间/h	渗氮层深度/mm	渗氮层硬度 HV
560 ~ 570	4 ~ 6	0.03 ~ 0.04	950 ~ 1100

表 12-200 5Cr2MoNiV 钢的氮碳共渗处理规范

处理方法	温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/h	介 质 (质量分数)(%)	扩 散 层	
				深 度 /mm	显微硬度 HV
氮碳共渗	560	2	KCN50 NaCN50	0.05	830 ~ 620
氮碳共渗	580	8	天然气 + 氨	0.25	825 ~ 600
渗氮	490 ~ 510	20 ~ 30	氨分解率 35 ~ 40	0.30 ~ 0.40	1200 ~ 700

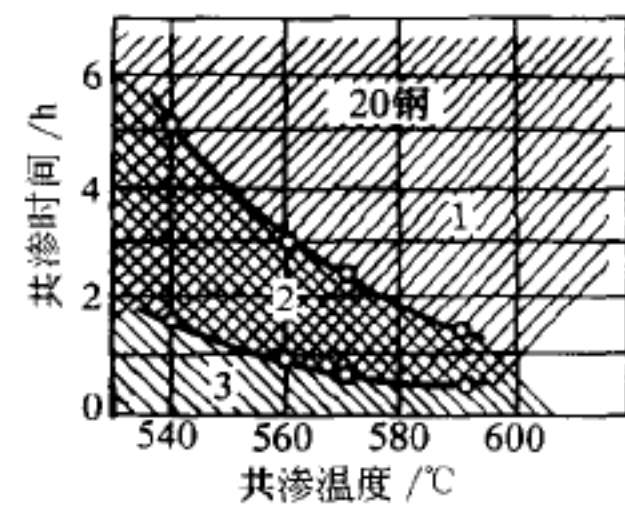


图 12-186 20 钢液体氮碳共渗的最佳规范图

1—多孔性渗层区 2—最佳规范区
3—渗层未充分发展区

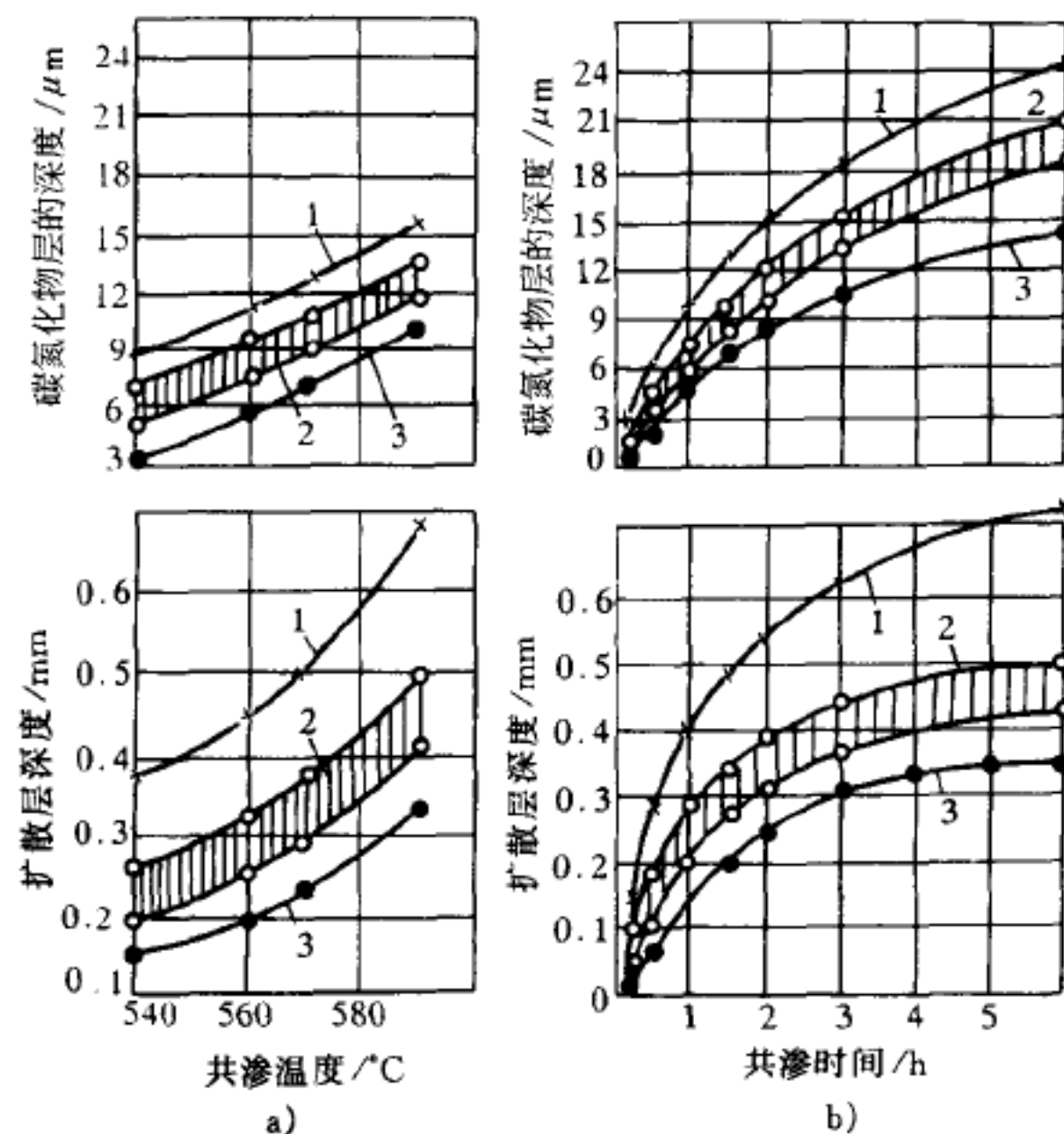


图 12-187 20 钢等, 液体氮碳共渗温度和时间对层深的影响

a) 共渗时间 1.5h b) 共渗温度 570°C

1—20 钢 2—40 钢, 40Cr, 40CrNi 钢 3—38CrMoAl 钢

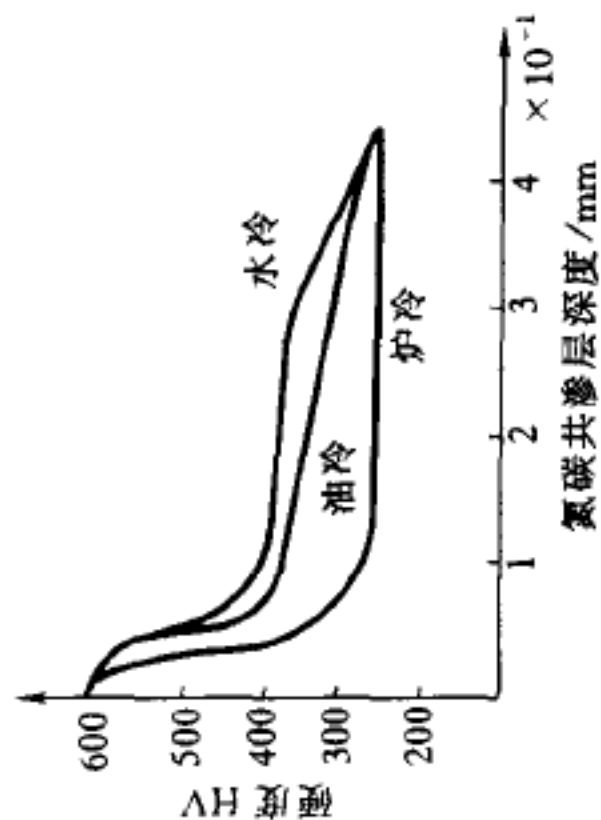


图 12-188 20 钢氮碳共渗后不同冷却方式对硬度的影响

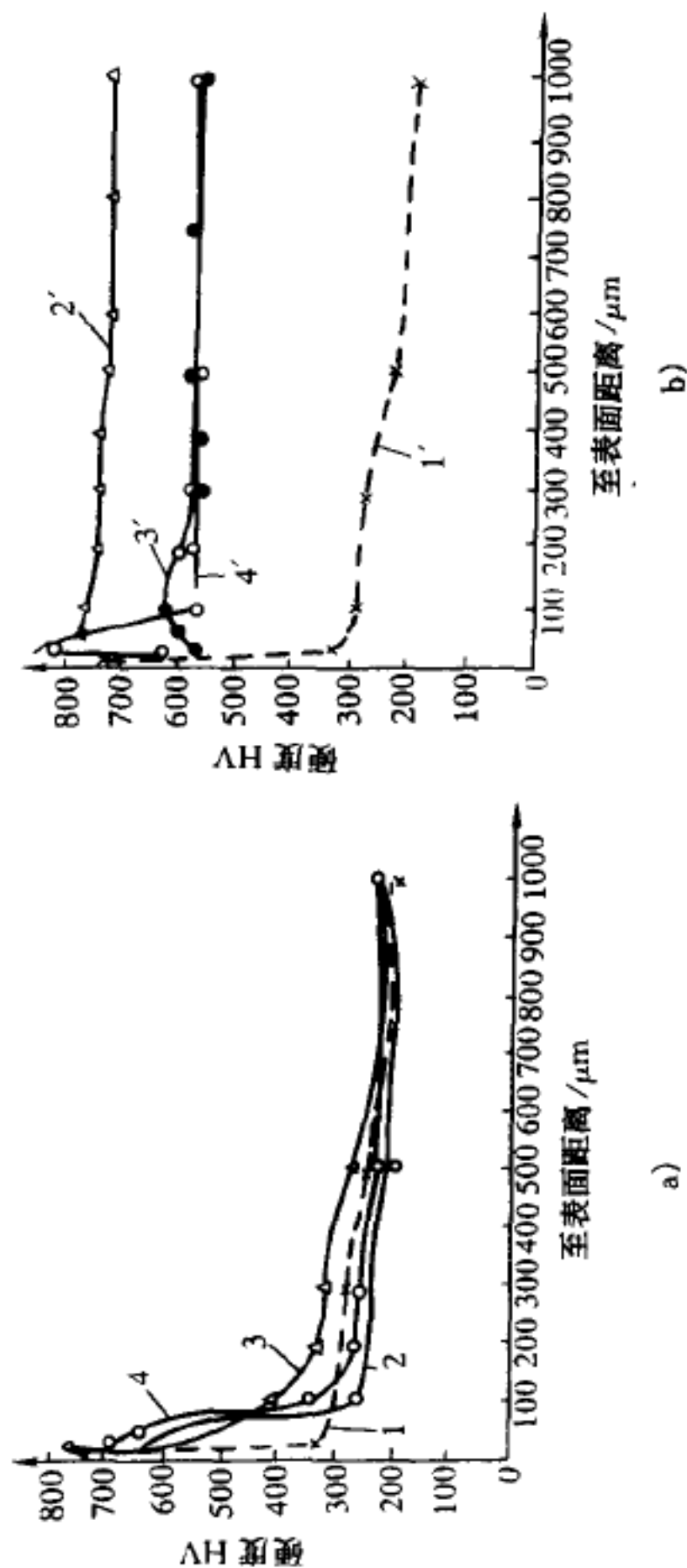


图 12-189 45 钢氮碳共渗 a) 和氮碳共渗 + 淬火 b) 后的硬度分布

a) 45 钢氮碳共渗 b) 45 钢氮碳共渗 + 淬火
1—580°C 2—620°C 1'—常规氮碳共渗 2'—氮碳共渗 + 盐浴淬火
3—650°C 4—700°C 3'—单盐浴淬火 4'—氮碳共渗 + 高频淬火

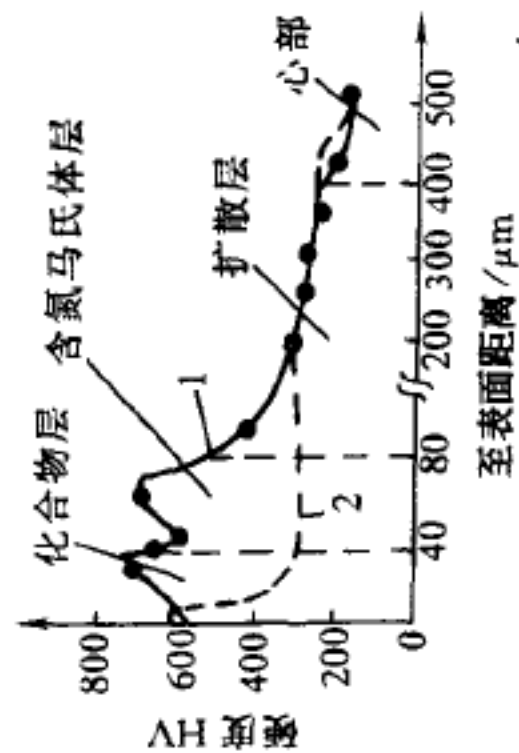


图 12-190 45 钢离子氮碳共渗后的硬度分布

1—630 ~ 640°C × 3h, 油冷
2—离子氮碳共渗 580°C × 8h

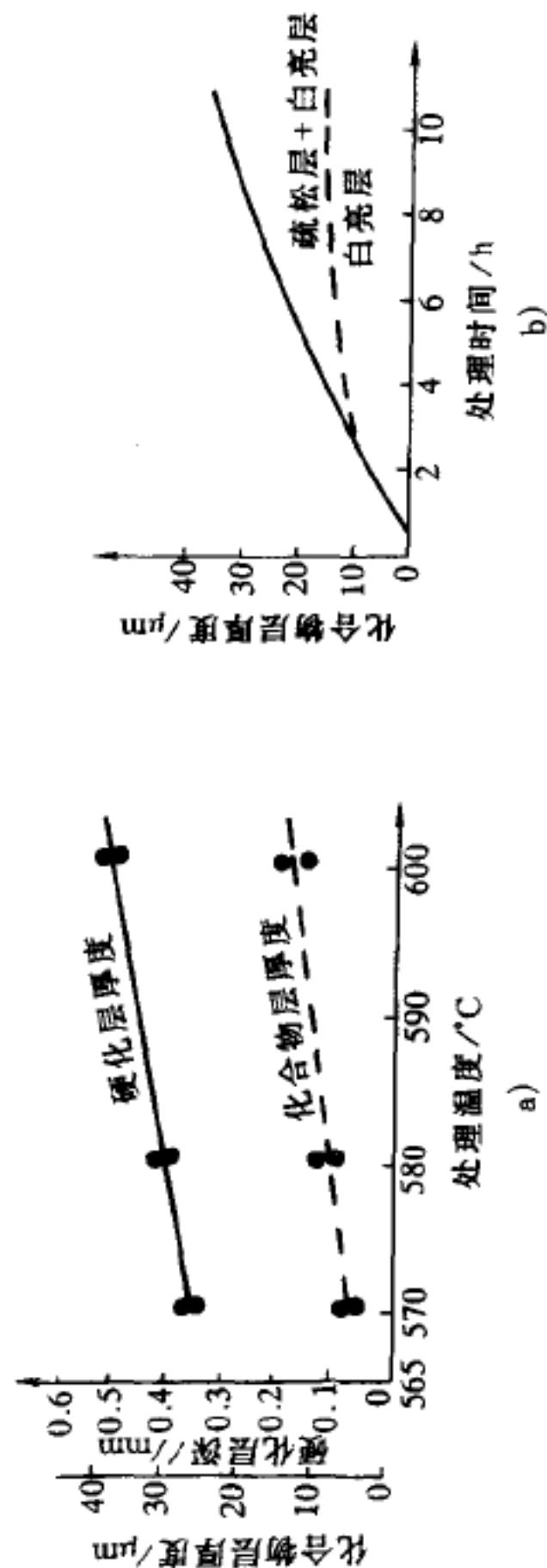


图 12-191 50 钢气体氮碳共渗温度 a) 和时间 b) 对层深的影响

(吸热式气氛, 加 NH_3)

a) 氮碳共渗 1.5h b) 570°C 氮碳共渗

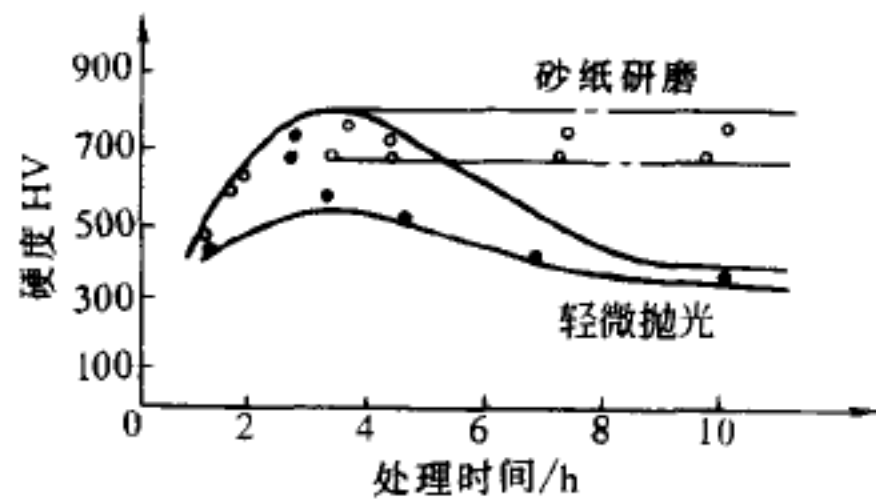


图 12-192 50 钢气体氮碳共渗时间对表面硬度的影响
(在吸热式气氛 + NH_3 中于 570°C 氮碳共渗)

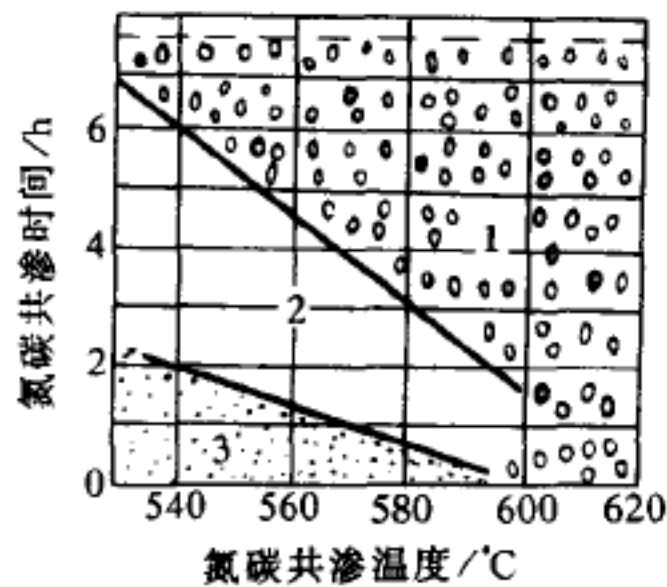


图 12-194 40Cr 钢(包括 40CrNi)液体氮碳共渗的最佳规范
1—多孔性共渗区 2—最佳规范区
3—共渗层未充分发展区

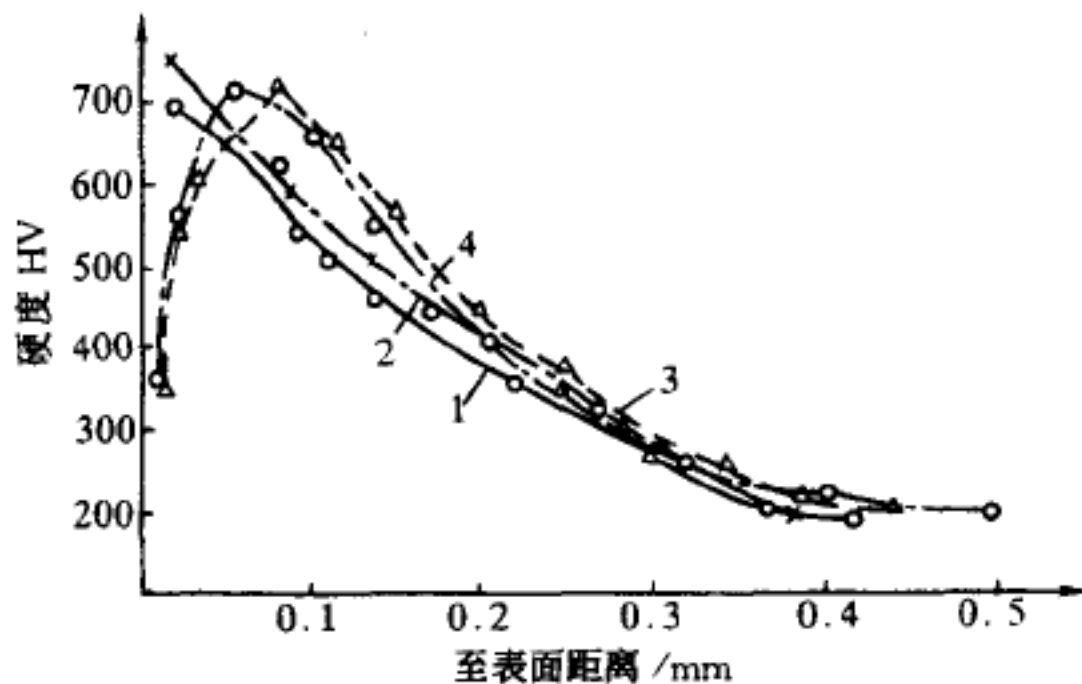


图 12-196 20CrMnTi 钢经各种不同化学热处理后的硬度分布
(均 $570^\circ\text{C} \times 3\text{h}$: 1—离子渗氮 2—离子氮碳共渗 3—离子硫氮共渗, 酒精 + 二硫化碳 + 氮 4—离子硫氮共渗, 氮 + 硫化氢)

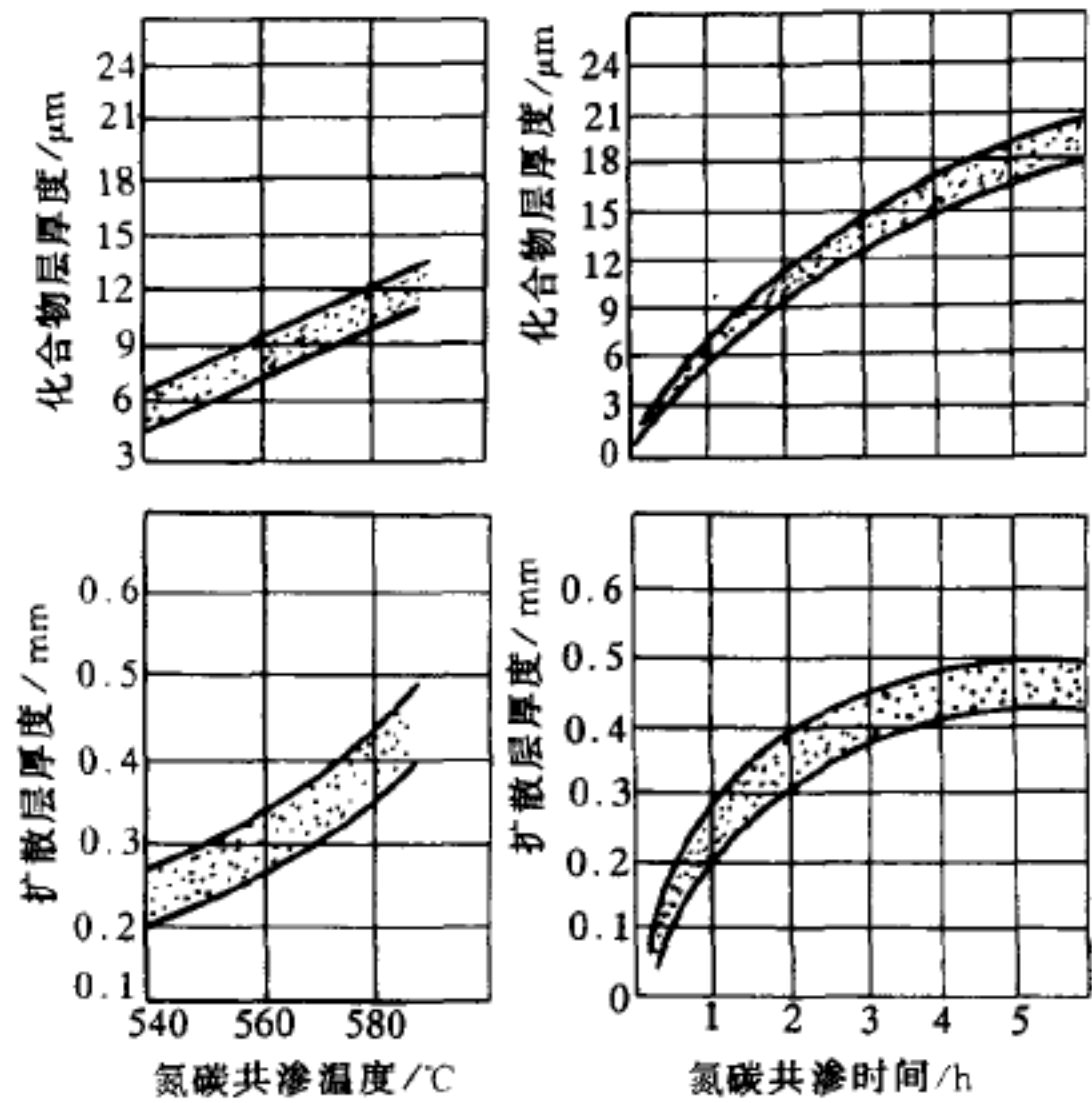


图 12-193 40Cr 钢盐浴氮碳共渗温度 a) 和时间 b) 对渗层深度的影响(包括 40 钢, 40CrNi)
a) 1.5h b) 570°C

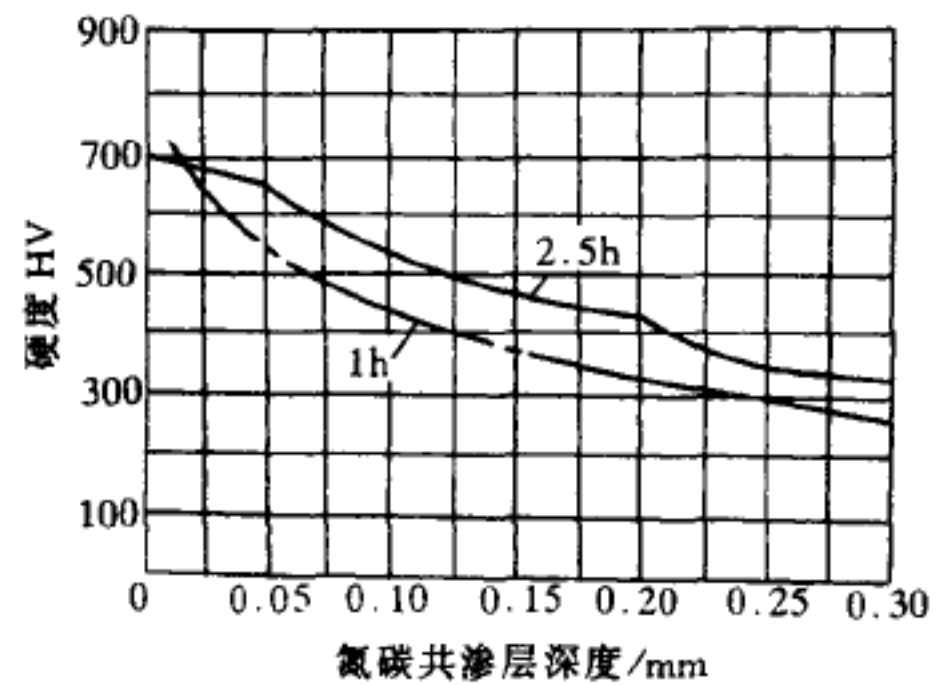


图 12-195 40Cr 钢气体氮碳共渗后的硬度分布
(570°C 氮碳共渗, 尿素加入量 1000g/h)

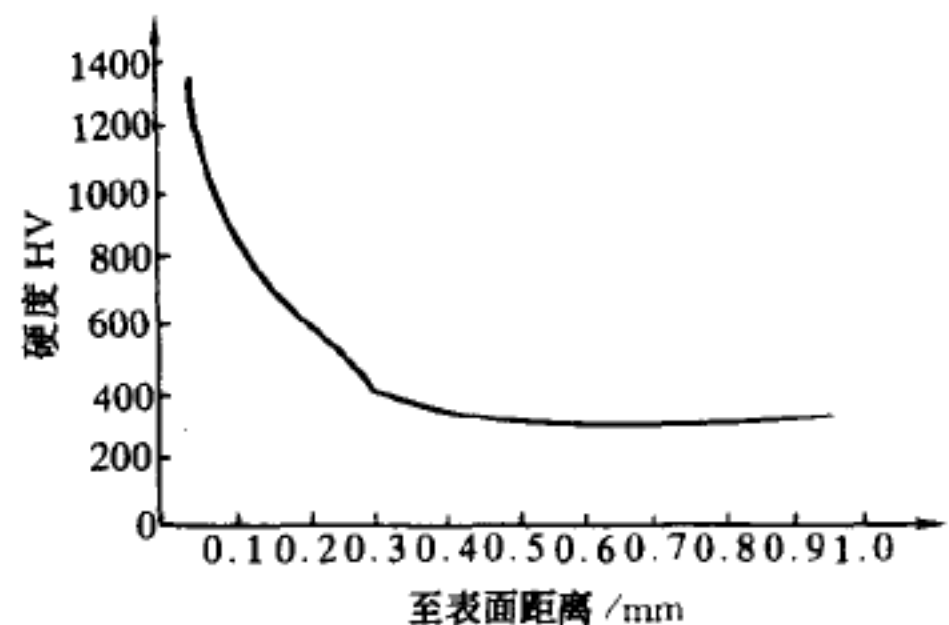


图 12-197 38CrMoAl 钢气体氮碳共渗后的硬度分布
(570°C , 3h)

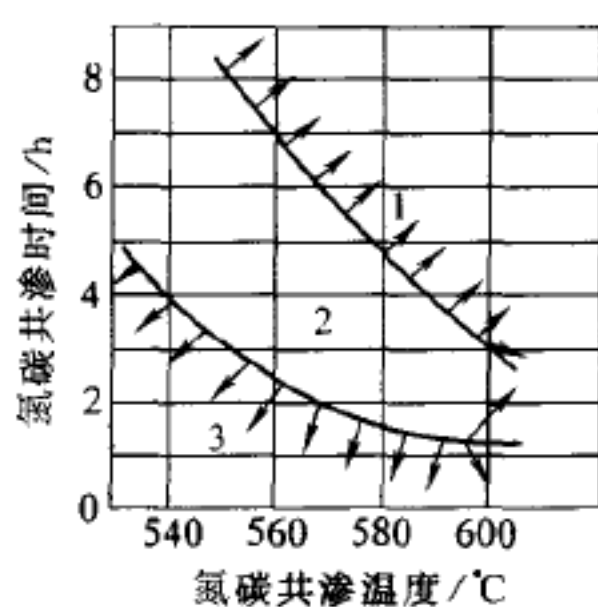


图 12-198 38CrMoAl 钢液体氮碳共渗最佳规范
共渗最佳规范
1—多孔性共渗区 2—最佳共渗区
3—共渗层未充分发展区

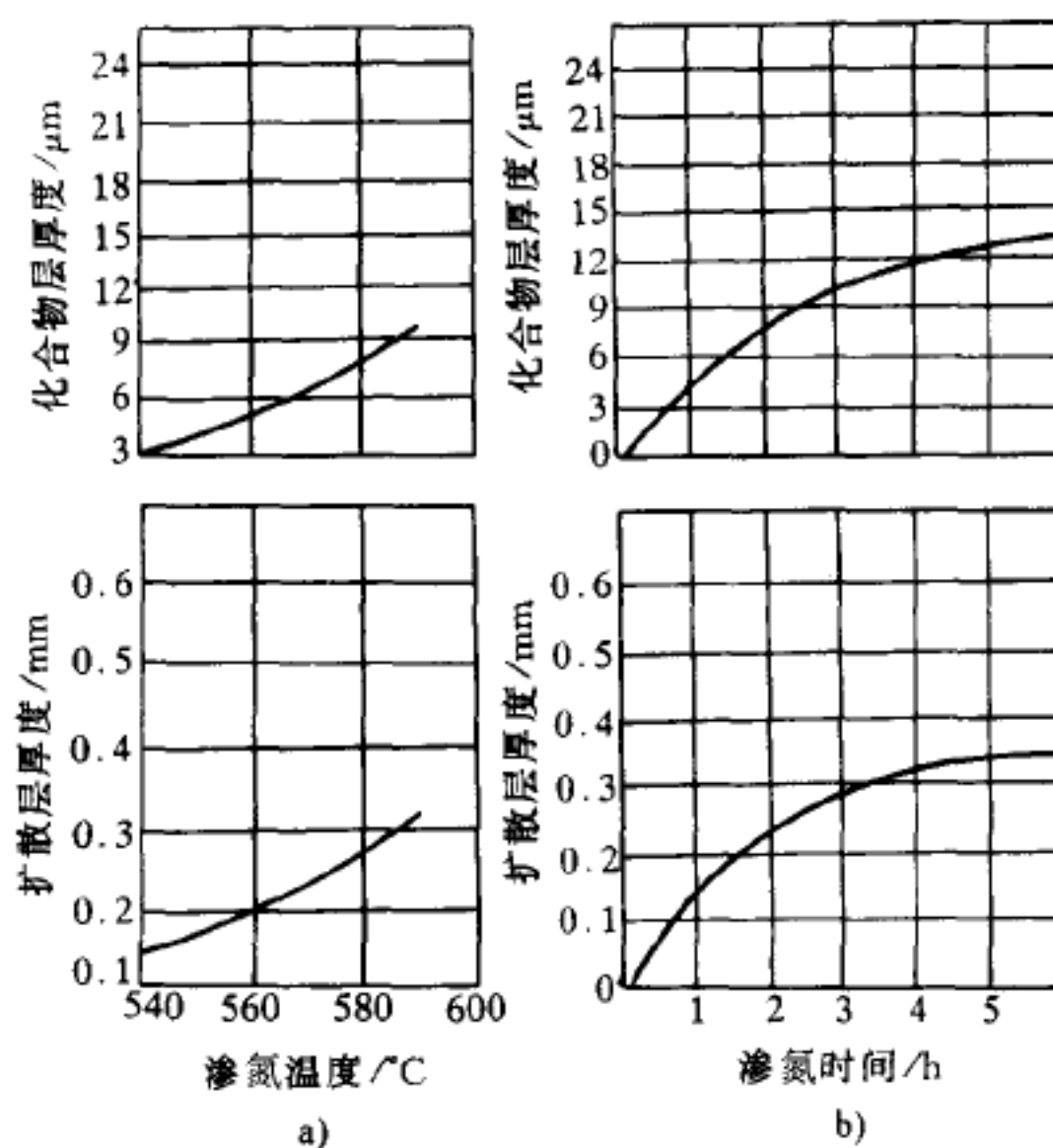


图 12-199 38CrMoAl 钢液体氮碳共渗温度 a) 和时间 b) 对碳氮化合物层深度及扩散层深度的影响

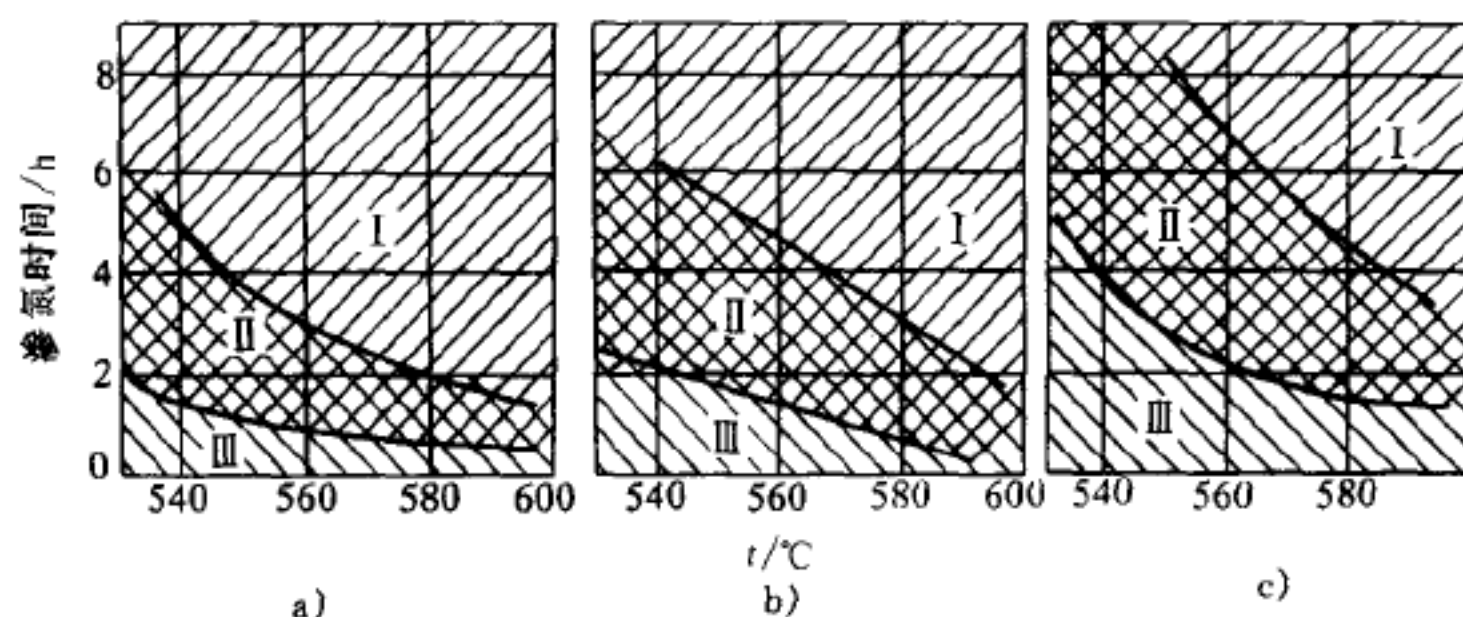


图 12-200 钢的渗层的孔隙率与液体氮碳共渗规范的关系

a) 20 钢 b) 40Cr、40CrNi 钢 c) 38CrMoAl 钢

I—多孔层区 II—优化规范区 III—渗层扩展不足区

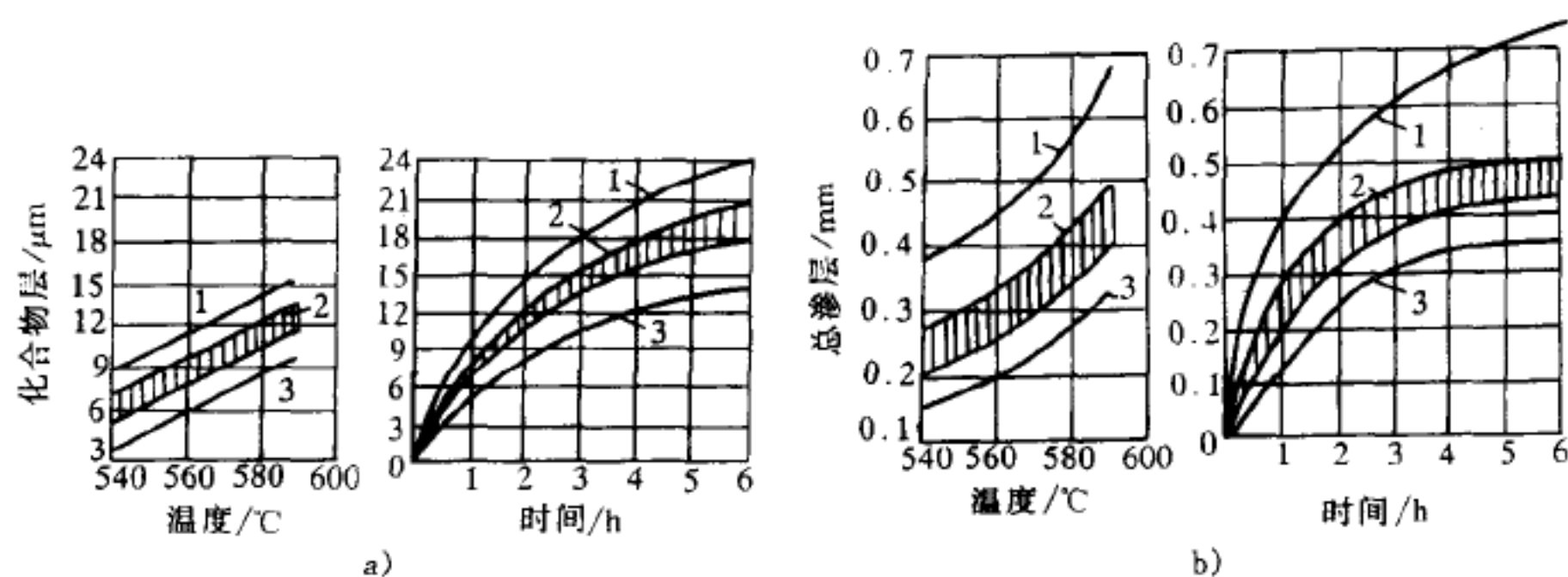


图 12-201 钢的碳氮化合物层 a) 和总渗层 b) 的厚度 δ
与氮碳共渗的温度和时间的关系

1—20 钢 2—40、40Cr、40CrNi 钢 3—38CrMoAl 钢

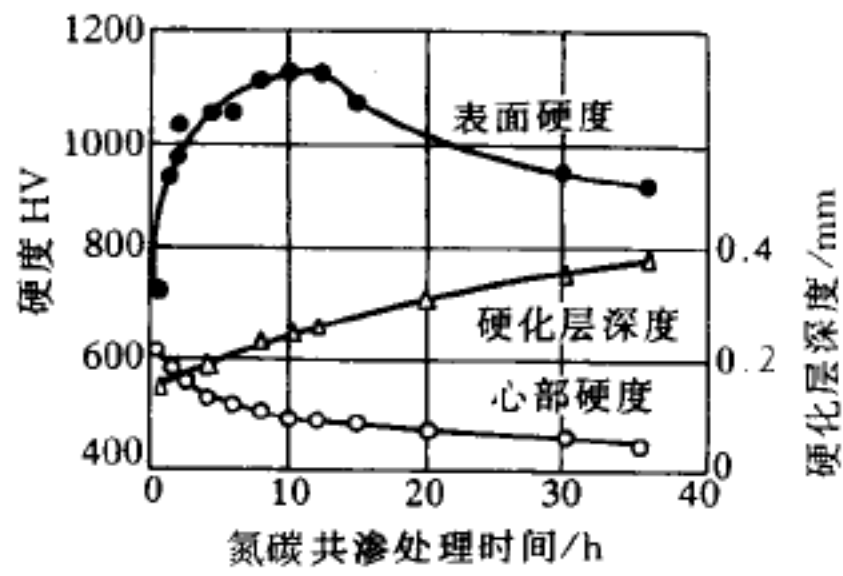


图 12-202 Cr12MoV 钢盐浴氮碳共渗处理时间对表面硬度、心部硬度、硬化层深度的影响

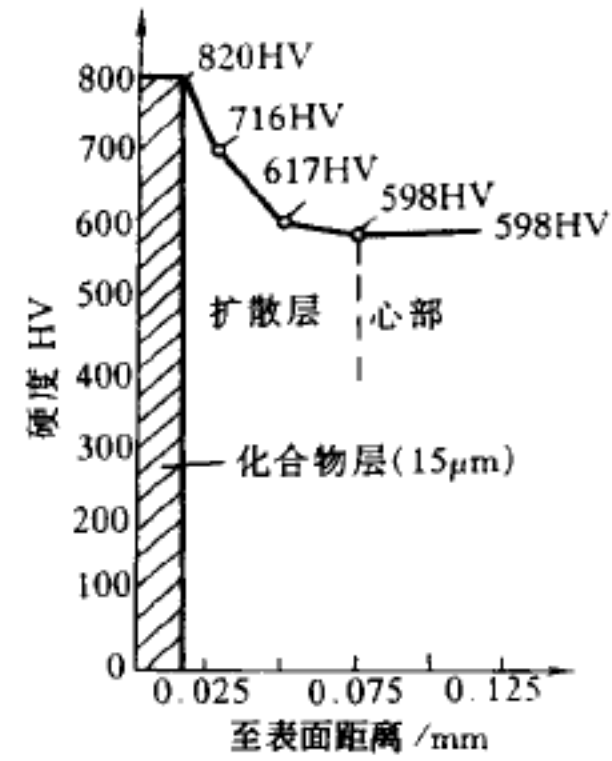


图 12-203 Cr12MoV 钢气体氮碳共渗后的硬度分布 (Nitemper 法处理, 570℃ × 4h, 油冷)

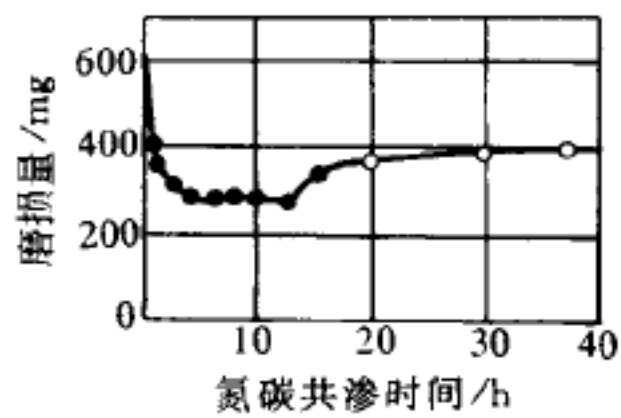


图 12-204 Cr12MoV 钢(SKD11)盐浴氮碳共渗时间与磨损量的关系 (磨损时间为 8.5h, 载荷 1000N, 转速 800r/min)

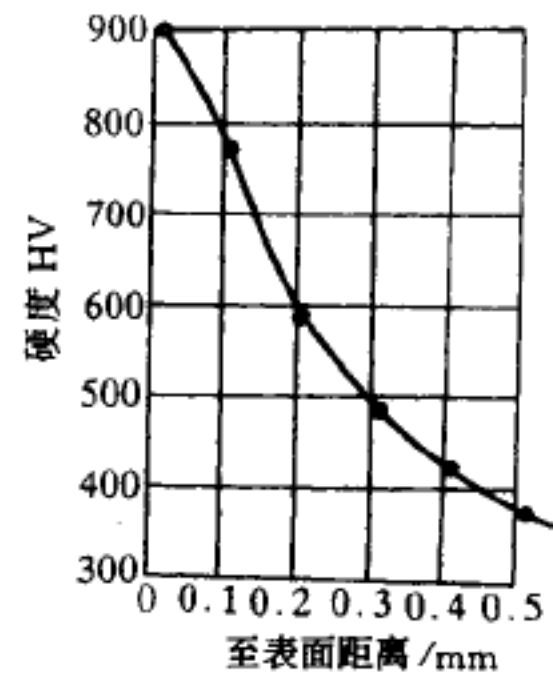
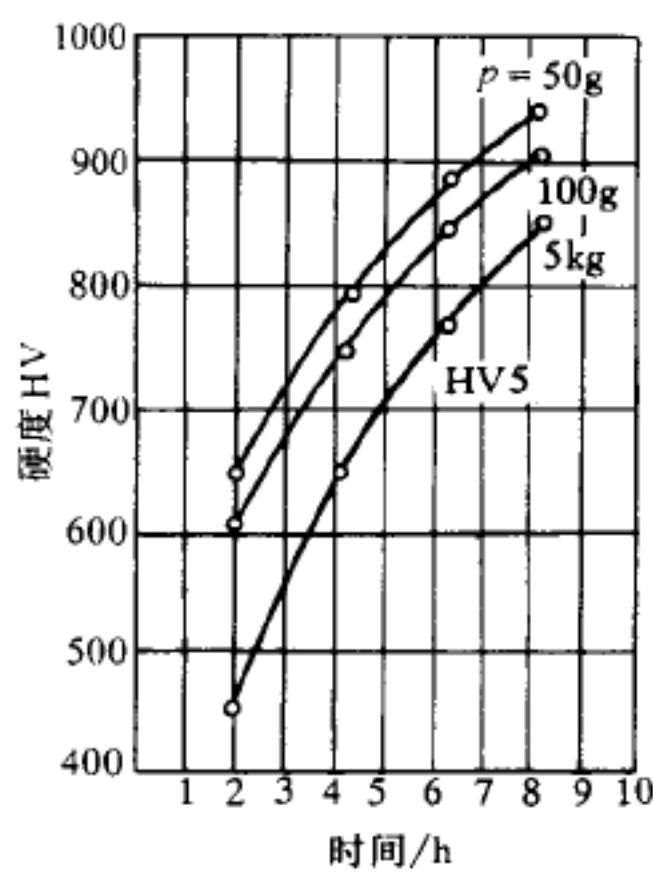
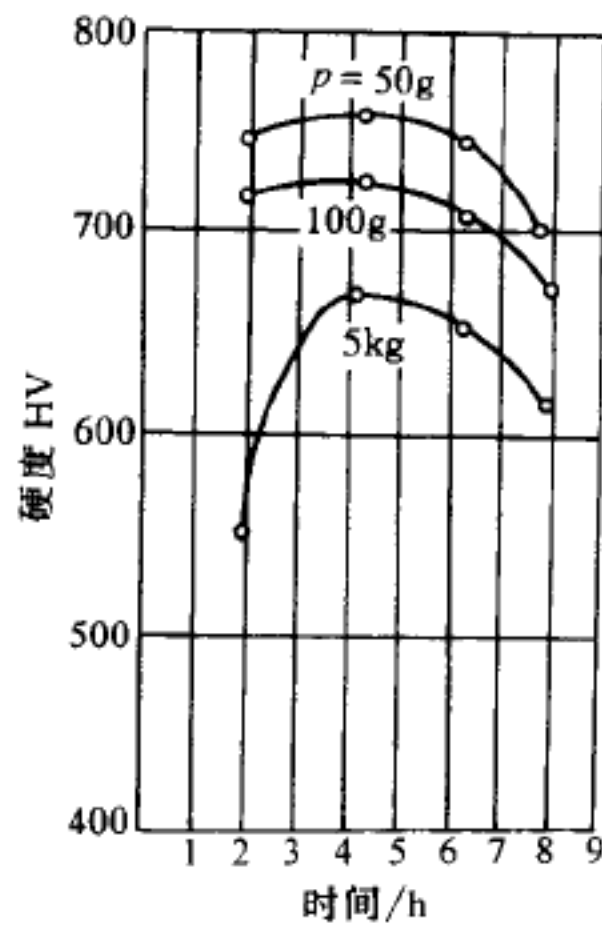


图 12-205 3Cr2W8V 钢气体氮碳共渗后的硬度分布 (560℃ × 8h)



a)



b)

图 12-206 3Cr2W8V 钢气体氮碳共渗时间对硬度的影响
a) 560℃ 氮碳共渗 b) 580℃ 氮碳共渗

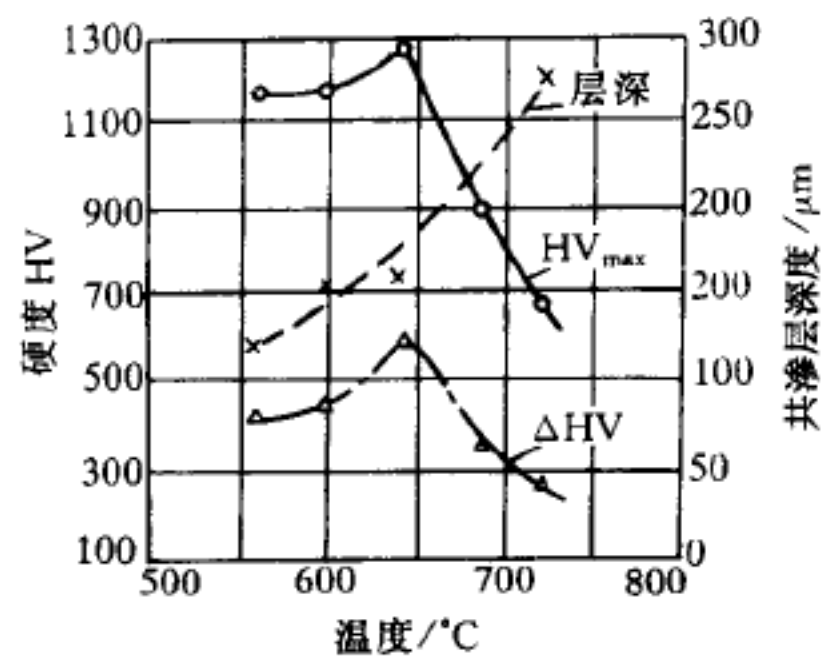


图 12-207 高速钢用尿素氮碳共渗 3h 后共渗温度和 $HV_{0.1max}$ (共渗层最高硬度)、 $\Delta HV_{0.1}$ (硬度提高幅度) 及渗层深度之间的关系

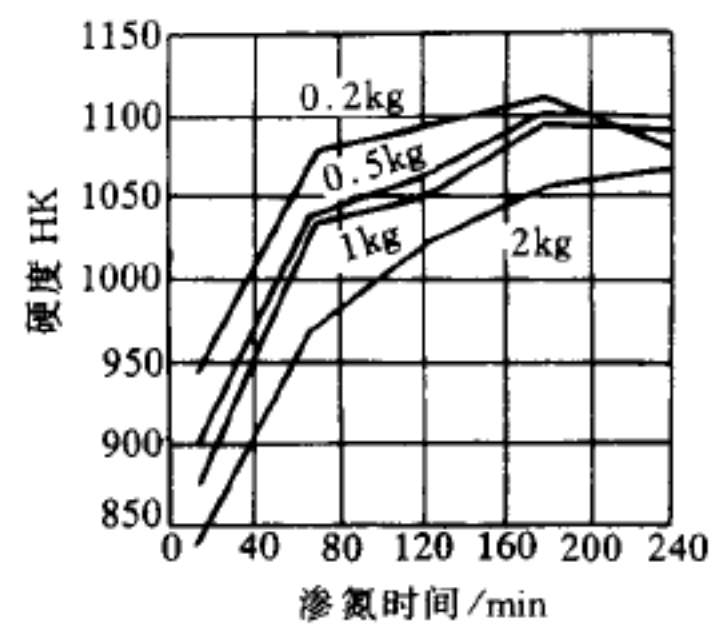


图 12-208 W18Cr4V 钢淬火后 565℃ 液体氮碳共渗不同时间后的显微硬度值 (图中所示 2~20N 为显微硬度载荷)

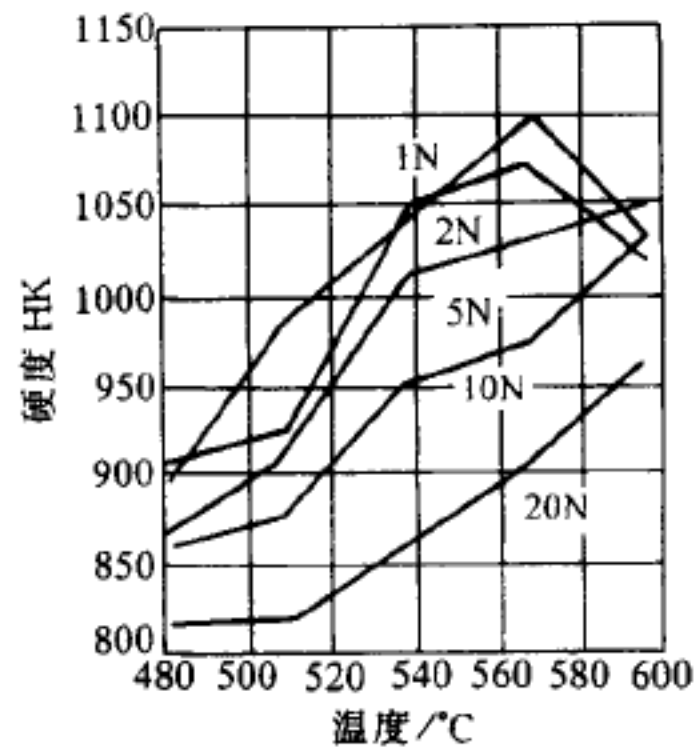


图 12-209 W18Cr4V 钢淬火后在不同温度下液体氮碳共渗后的显微硬度值 (共渗 30min 图中所示 1~20N 为显微硬度载荷)

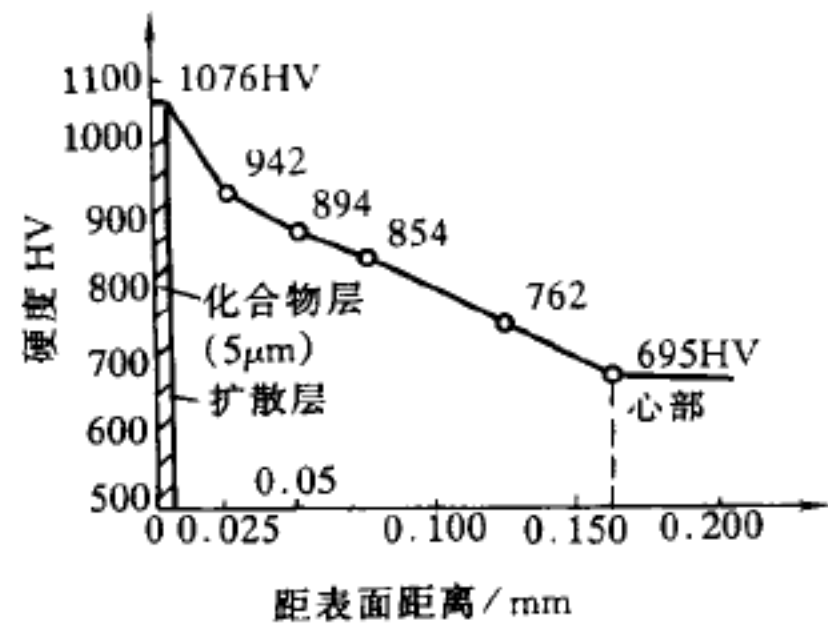


图 12-210 W6Mo5Cr4V2 钢气体氮碳共渗后的硬度分布 (570℃ × 4h 油冷)

12.8 渗金属工艺及性能(表 12-201 ~ 表 12-224 和图 12-211 ~ 图 12-222)

1. 渗铬(表 12-201 ~ 表 12-211 和图 12-211 ~ 图 12-217)

表 12-201 渗铬层的成分与组织

钢中碳含量(%)	渗层中平均碳含量(%)	渗层中平均铬含量(%)	渗层的组织结构
0.05		25	α
0.15	2~3	24.5	$\alpha + (Cr, Fe)_7C_3$
0.41	5~7	30	$(Cr, Fe)_7C_3$
0.61	5~6	36.5	$(Cr, Fe)_7C_3$
1.04	8	70.0	$(Cr, Fe)_{23}C_6, (Cr, Fe)_7C_3$
1.18	8	≥ 80.0	$(Cr, Fe)_{23}C_6, (Cr, Fe)_7C_3, (Cr, Fe)_3C$

注:碳、铬含量均为质量分数。

表 12-202 常用的固体渗剂与处理工艺

编号	渗铬剂的成分(%)	材 料	处理工艺		渗层深度 / μm	备 注
			温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/h		
1	Cr 粉 50, Al_2O_3 48 ~ 49, HN_4Cl 1 ~ 2	低碳钢	980 ~ 1100	6 ~ 10	50 ~ 150	
		高碳钢	980 ~ 1100	6 ~ 10	20 ~ 40	
2	Cr-Fe 粉 48 ~ 50, Al_2O_3 48 ~ 50, NH_4I 2	铬钨钢	1100	14 ~ 20	15 ~ 20	
3	Cr-Fe 粉 (含 Cr65, CO.1) 60, 陶土 39.8, NH_4I 0.2	碳 钢	850 ~ 1100	15	40 ~ 60	英国 DAL 法
4	Cr 粉 51 ~ 52, Al_2O_3 45 ~ 47, AlF_3 2 ~ 3	铸 铁	950	6	10 ~ 15	俄罗斯应用
5	Cr-Fe 粉 60, NH_4Cl 2 ~ 5, KBF_4 5 ~ 10, NH_4F 1 ~ 2, 余 Al_2O_3					添加粘结剂形成粒状渗剂,可减少 Cr 粉消耗,提高渗速
6	Cr-Fe55, Cr_2O_3 43, NH_4Cl 定量通 H_2 及排气	低碳钢	1000	6	55	渗铬箱上加通气和排气装置
7	Cr 粉:Fe 粉: Al_2O_3 = 2:1:7,另加 NH_4Cl 1 ~ 2,通 H_2	S590 合金	1050	20	30 ~ 40	渗层表面 w_{Cr} 可达 80%
8	Cr 粉 73.5%, Al_2O_3 23%, NH_4Cl 2%, NaF , KHF_2 0.5	低碳钢	1000 ~ 1100	4 ~ 8	50	NaF , KHF_2 是清洁剂

注:成分均指质量分数。

表 12-203 液体渗铬盐浴成分与处理工艺

编号	渗铬盐浴成分(%)	处 理 工 艺		渗层深度 / μm	备 注
		温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/h		
1	Cr 粉 5 ~ 15, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 85 ~ 95	1000	6	14 ~ 18	盐浴成分有密度偏析
2	Cr_2O_3 粉 10 ~ 12, Al 粉 3 ~ 5, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 85 ~ 90	950 ~ 1050	4 ~ 6	15 ~ 20	盐浴流动性较好
3	BaCl_2 70, NaCl 30, 另加经盐酸处理的 Cr 粉 (或 Cr-Fe 粉)	1050	1 ~ 5		用还原气氛保护
4	Ca 粉 90, Cr 粉 10	1100	1	50	用 Ar 气或浴面覆盖保护剂

注:成分均指质量分数。

表 12-204 常用的气体渗铬介质与处理工艺

编号	渗铬介质(%)	钢 材	处理工艺		渗层厚度 / μm	备 注
			温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/h		
1	Cr 块 (经 $\text{NH}_4\text{F} \cdot \text{HF}$ 活化处理) KH_4Cl , H_2	35CrMo	1050	6 ~ 8	20 ~ 30	断续加入 NH_4Cl , 通 H_2 气
		纯 铁	1050	6 ~ 8	200	
2	α 合金 (活性 Cr 源), 氟化物 (清洗剂), 通卤化氢, H_2	—	900 ~ 1000	5 ~ 12	254 ~ 380	Alphatized 法
3	CrCl_2 , N_2 (或 $\text{H}_2 + \text{N}_2$)	42CrMo	1000	4	40	日 本
4	Cr30 ~ 60, Al_2O_3 40 ~ 60, NH_4F , 通 H_2	—	900 ~ 1200	—	—	
5	Cr-Fe 陶瓷碎片, 通 HCl	—	1050	—	—	Cr-Fe (Cr65, CO.1)

注:成分皆指质量分数。

表 12-205 几种渗铬膏剂成分及渗铬效果

编号	膏剂成分(%)	膏剂涂敷方法	渗铬层深度/ μm	渗层特征	试样表面质量
1	Cr 粉 97, NH_4Cl 3	用正硅酸乙酯湿润零件	28 ~ 30	均匀, 可见到过渡层	表面洁净, 无光泽, 无膏剂粘附
2	Cr 粉 75, 冰晶石 25	用正硅酸乙酯湿润零件	28 ~ 30	均匀, 可见到过渡层	表面灰色, 有少量膏剂粘附
3	Cr 粉 95, $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, NH_4Cl	用正硅酸乙酯湿润零件	28 ~ 30	均匀, 可见到过渡层	表面洁净, 有光泽膏剂可用热水涮掉
4	纯铬粉 ^①	用正硅酸乙酯湿润零件	40	均匀, 可见到过渡层	表面光洁, 有光泽无膏剂粘附

注: 成分指质量分数。

① 用 Ar 气保护, 在 HCl 介质中渗铬。

表 12-206 真空渗铬工艺

方 法	渗 铬 剂	处 理 工 艺			
		真 空 度 / $\times 133.32\text{Pa}$	温 度 / $^{\circ}\text{C}$	时 间 /h	渗层深度 /mm
真空蒸发法	Cr 块	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	950 ~ 1050	1 ~ 6	T12 钢 0.03
低(减)压气体法	CrCl_2	20	1100	5	—
低真空粉末法(%)	Cr30, Al_2O_3 70, 外加 HCl5	10^{-1}	1000 ~ 1100	7 ~ 8	—

注: 成分组成指质量分数。

表 12-207 渗铬层厚度的选择

编号	工 作 条 件	推荐的渗层组织	推荐的渗层深度/mm
1	在高温强烈腐蚀介质中	富铬的 α 固溶体	0.10 ~ 0.15
2	在腐蚀不剧烈的介质(如大气)中	富铬的 α 固溶体	0.08 ~ 0.10
3	在磨损、腐蚀都剧烈的条件下	铬的碳化物	0.025 ~ 0.030
4	在磨损条件下工作的带锐角的小截面零件	铬的碳化物	0.01 ~ 0.015
5	在高温氧化条件下	铬的碳化物	0.01 ~ 0.02

表 12-208 含铬共渗与复合渗

工 艺	渗层性能特点	渗剂成分(%) (质量分数)	处理工艺		渗层厚度 / μm
			温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/h	
Cr-Si 共渗	提高耐磨(包括冲蚀磨损)、耐蚀(气蚀、气体腐蚀、电化学腐蚀)能力, 渗层具有高的热稳定性和耐急冷急热性。抗高温氧化性和耐蚀性优于渗铬层, 韧性优于渗硅层。渗层中含 $w_{\text{Cr}} 20\%$ 、 $w_{\text{Si}} 5\%$	铬粉 53, 硅粉 3, Al_2O_3 42, NH_4Cl 2。通 $\text{H}_2 + \text{HCl}$ 气体	1000 1000	10 20	150 200 ~ 250
Cr-Ti 共渗	提高抗氧化、耐腐蚀、耐磨及耐气蚀性。还可用于提高热稳定性。其抗高温氧化性及耐磨性均高于渗铬层。渗层表面硬度 2200HV	Cr_2O_3 粉 70, TiO_2 粉 30, 另加 Al15(还原剂)	1100	4	30 ~ 60
Cr-Ti/V/ Nb 复合渗	在高硬度的 VC、TiC、NbC 与基体中间的碳化铬, 使渗层硬度逐渐降低, 从而使其抗冲击剥落性、抗蚀性高于单一碳化物层	渗铬(或镀铬)后, 在一定成分的硼砂盐浴中扩散渗入钒、钛、铌, 在表层形成复合碳化物层。如含钒盐浴: 无水硼砂 90 + 钒 10 或钒铁 10 (含钒 67)	900 ~ 1050	2 ~ 8	10 ~ 20

(续)

工 艺	渗层性能特点	渗剂成分(%) (质量分数)	处理工艺		渗层厚度 / μm
			温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/h	
Cr-RE 共渗	提高渗铬速度,改善渗铬层质量。少量稀土渗入渗层中,使渗铬层的耐腐蚀、抗高温氧化、韧性、耐磨性都得到了提高	渗铬盐浴中加入适量的稀土添加剂	950	4~8	10~15
C-Cr 复合渗	先渗碳后渗铬可增加碳化物层厚度,渗层下没有贫碳区。Cr-Cr 复合渗层具有高硬度、疲劳强度(包括腐蚀疲劳强度)、耐磨性以及热稳定性和在各种介质中的耐蚀性(包括在铝合金、锌合金熔体的浸蚀性)	—	—	—	—
Cr-V 共渗后再渗 N	渗层抗高温氧化、磨损性比渗铬或铬钒共渗好	Cr-V 共渗后气体渗氮	1050	8	共渗层 100~400, 氮化物层
			540	6	10~20

表 12-209 42CrMo 钢渗铬及热处理后的力学性能

处 理 工 艺	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ (%)	ψ (%)	a_K / $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$
未渗铬淬油,600 $^{\circ}\text{C}$ 回火	931	1014	18	61.5	183.3
1050 $^{\circ}\text{C}$,8h 渗铬正火,600 $^{\circ}\text{C}$ 回火	647	799	17.5	67.5	100.0
1050 $^{\circ}\text{C}$,8h 渗铬正火,淬油,600 $^{\circ}\text{C}$ 回火	926	1009	16	60	182.3
1050 $^{\circ}\text{C}$,8h 渗铬等温淬火,600 $^{\circ}\text{C}$ 回火	740	892	19	63	142.1

表 12-210 渗铬件常见缺陷及防止措施

缺陷类型	产 生 原 因	防 止 措 施
粘 铬	粉末渗铬时,渗剂未烘干,有水分及低熔点杂质	将氧化铝进行焙烧,装罐前烘干渗剂
剥 落	渗层为碳化铬时易出现剥落,随着层厚增加剥落的可能性也增加,特别在渗铬或热处理后冷却过快以及工件尖锐的部位易剥落	适当控制碳化铬层厚度,选用合适的工艺与工件结构,尽量避免尖角
点 蚀	渗铬件在大气中长期放置往往有点蚀出现。原因尚不明	
脱 碳	1. 粉末渗铬时,在渗剂使用多次后易脱碳 2. 气相渗铬时水气、氢气过量	1. 加强密封或通保护气体防止铬粉氧化。补加新渗剂 2. 严防水气出现,调整运载气体
贫 碳	铬渗入钢表面将心部碳吸至表面形成碳化铬,致使渗铬层下面出现贫碳区	在钢中加入碳化物形成元素,如钛、钒、铬、钼、锰等,以阻止碳向外扩散,生产上通常采用含钛钢
腐 蚀 斑	催渗剂用量过多	控制催渗剂用量

表 12-211 形成 V、Nb、Ti 碳化物层的方法与工艺

方 法	渗 剂 成 分 (%) (质量分数)	处 理 工 艺		碳化物层厚度/ μm
		温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/h	
硼砂盐浴法	V 粉 10(或 V-Fe 粉 10), $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (脱水)90	1000	5.5	22~24.5
	V_2O_5 粉 10,Ca—Si 粉 5(或 Al 粉 5), $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 85	950~1000	8	15~25
	Nb 粉 7~10, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (脱水)90~93	1000	5.5	17.2~20.0
	Nb_2O_5 粉 10,Al 粉 9, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 81	1000	4	12

(续)

方 法	渗 剂 成 分 (%) (质量分数)	处 理 工 艺		碳化物层厚 度/ μm
		温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/h	
中性盐浴法	KCl22.2, NaCl22.2, V-Fe 粉 44.4, Al_2O_3 11.2	1000	5	
	$(2\text{KCl} + \text{BaCl}_2)95, \text{K}_2\text{TiF}_6 5$			
	$\text{NaCl}40, \text{Na}_2\text{CO}_3 10$ 加入 TiFe (或 WFe)40 和 $\text{Al}_2\text{O}_3 10$ 混合物	1000	1~5	2~13
	$\text{BaCl}_2, \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (脱水), 渗 V 剂	950	4	10
粉 末 法	VFe 粉 50, $\text{KBF}_6 10, \text{NH}_4\text{Cl} 6, \text{AlI}, \text{Al}_2\text{O}_3 33$	960	6	10~15
	Ti-Fe50 粉, $\text{NH}_4\text{Cl} 5$, 过氯乙烯 5, $\text{Al}_2\text{O}_3 40$	1000	6	10
气 体 法	扩散元素的卤化物气氛, H_2, CH_4	800~1200		
	Ti-Fe 粉(含 42.6Ti)64, $\text{Al}_2\text{O}_3(0.50\text{mm})34, \text{NH}_4\text{Cl} 2$, 氩气保护	850~900	1~5	

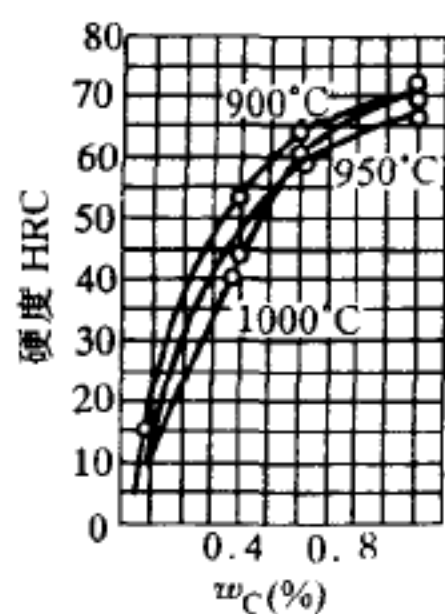


图 12-211 碳钢渗铬后的硬度
与碳含量关系
(渗铬 3h, 800°C 水淬, 150°C 回火)

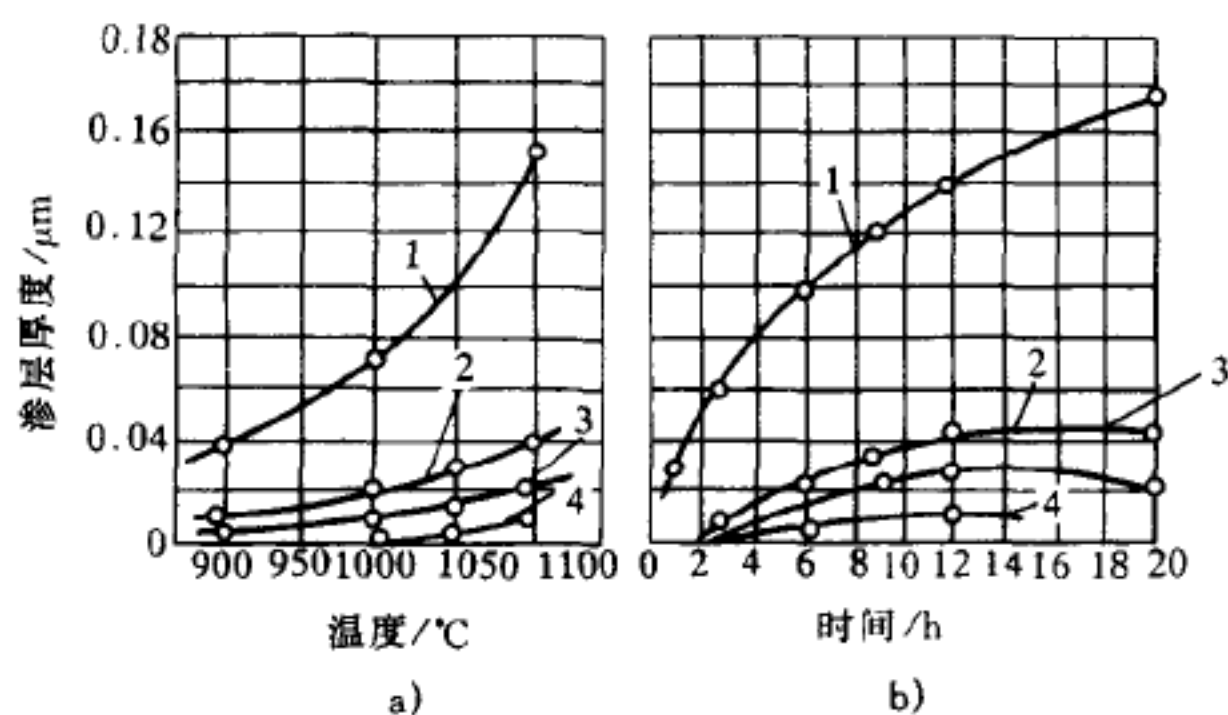


图 12-212 渗铬温度及时间对渗铬层厚度的影响
a) 温度的影响 (6h) b) 时间的影响 (1050°C)
1—工业纯铁 2—T8 3—40 钢 4—20 钢

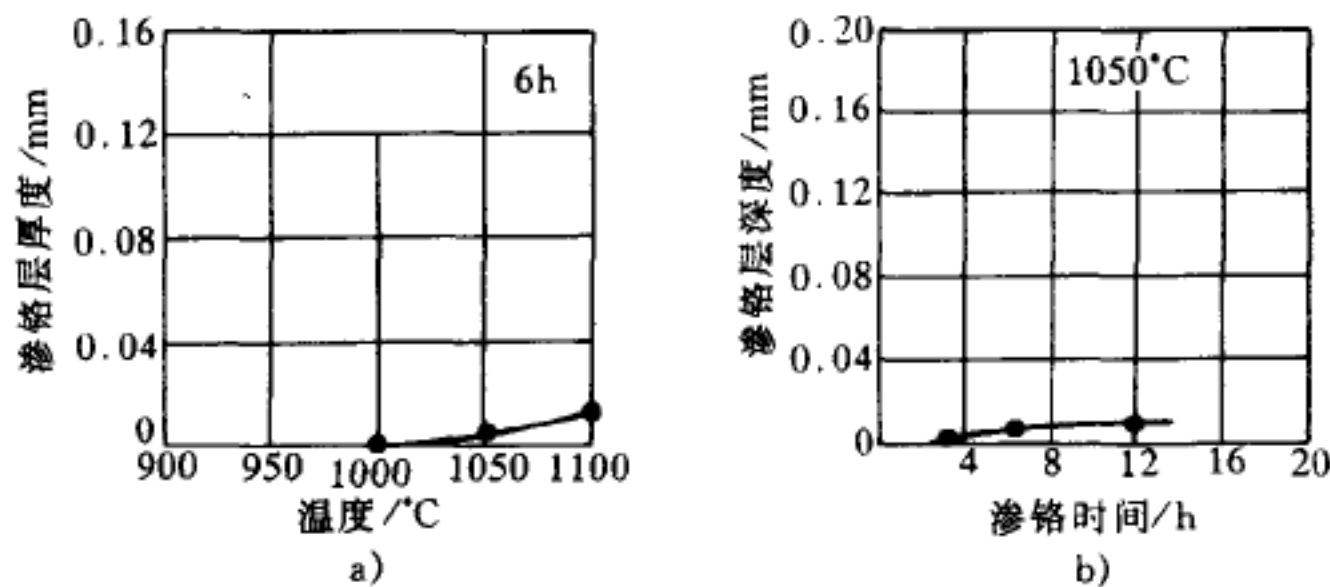


图 12-213 20 钢渗铬温度和时间对层深的影响
a) 温度的影响 b) 时间的影响

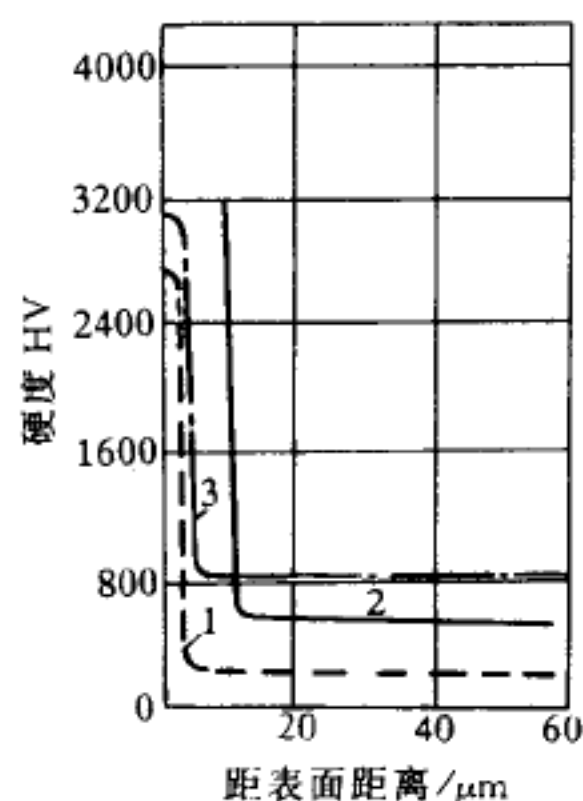


图 12-214 TiO、1Cr17Ni2、Cr12MoV 钢在 V_2O_5 硼砂浴中渗钒后的硬度分布
1—1Cr17Ni2 2—TiO 3—Cr12MoV

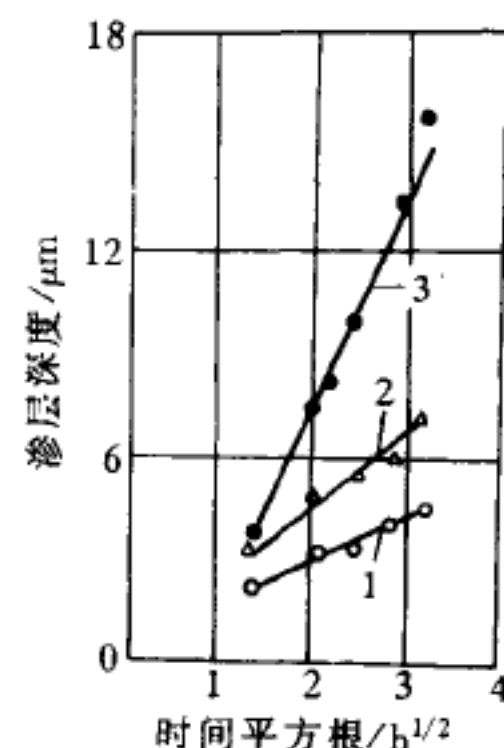


图 12-215 TiO 钢等在 V_2O_5 硼砂浴中渗钒时间与深度的关系曲线
1—20 钢 2—Cr12Mo 3—TiO

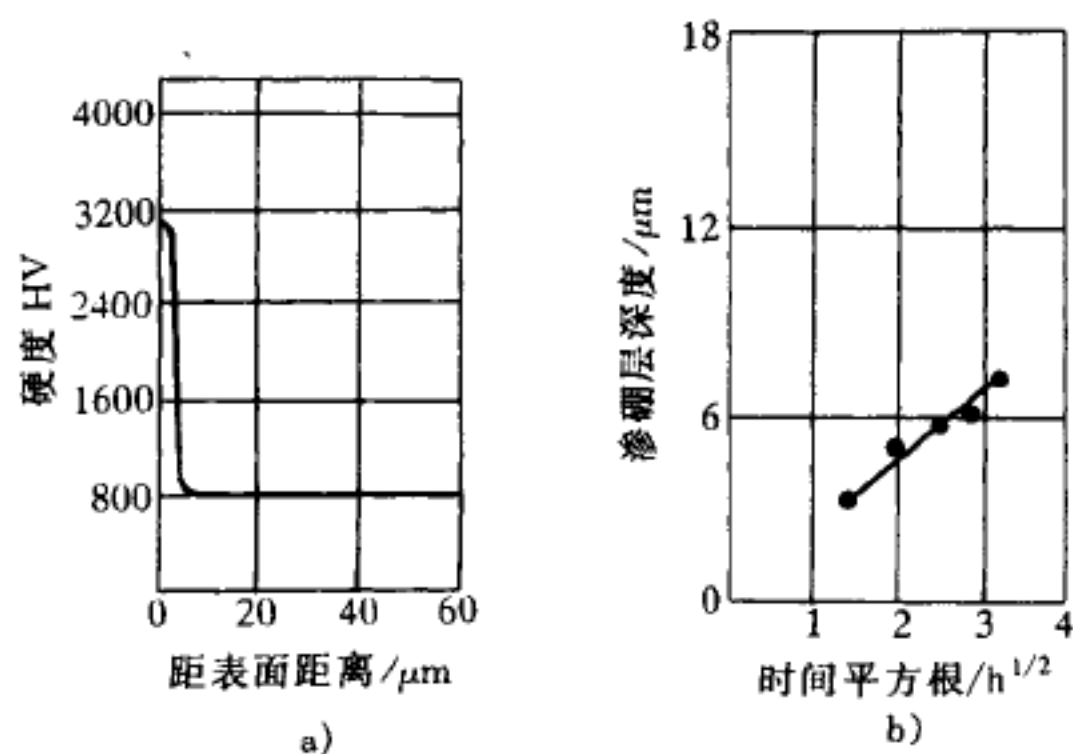


图 12-216 Cr12MoV 钢在 V_2O_5 硼砂浴中渗钒后的硬度分布
a) 及渗层深度与时间的关系 b)
a) 950℃ × 6h b) 950℃ 渗钒

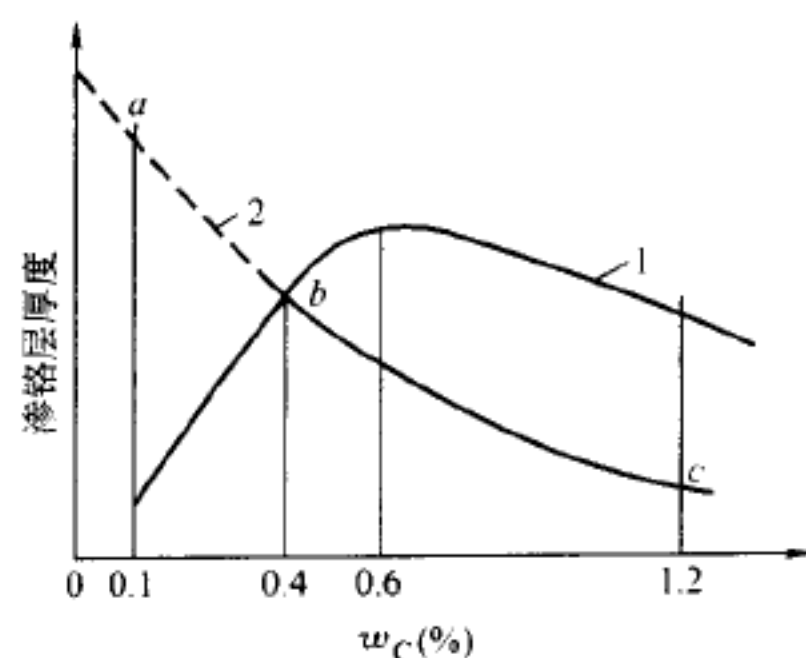


图 12-217 碳含量对渗铬层厚度的影响
1—碳化物层厚度 2—α 相厚度

2. 渗铝 (表 12-212 ~ 表 12-215 和图 12-218 ~ 图 12-222)

表 12-212 渗铝的应用举例

工 件 名 称	渗铝方法	用 途
高速公路护栏、电力输变电铁塔、桥梁钢结构、海上钻井塔架、自来水管、架空通信电缆、架空调心铝绞线的心线、船用钢丝绳、编织网用钢丝、瓦楞板	热镀锌	耐各种大气腐蚀、自来水、河水、海水腐蚀
化工生产用醋酸、柠檬酸、丙酸、苯甲酸等有机酸输送管道、煤气及含硫气体输送管道	热镀锌	耐有机酸、煤气、含硫气体腐蚀
汽车消声器、排气管、食品烤箱、粮食烘干设备烟筒	热镀锌	低于 600℃ 的耐热腐蚀和抗氧化
加热炉炉管、各类热交换器、炼钢炉吹氧管、硫酸转化器	热镀锌—扩散法或粉末法	高于 600℃ 的抗高温氧化, 高温含硫气氛热腐蚀
燃气轮机叶片、炉用结构件, 高温紧固件, 燃气、燃油烧嘴	粉末法, 料浆法	抗高温氧化及热腐蚀

表 12-213 几种渗铝方法的工艺过程和特点

渗铝方法	工 艺 过 程	特 点
液体(热浸)渗铝	将 Al 粉、Fe10% 粉混合在铁坩埚中熔化,工件在 680 ~ 800℃ 保持 15 ~ 60min	可加入 Si0.5% ~ 2%,以增加熔液的流动性 以耐蚀为目的的零件,液体(热浸)渗铝后可不必扩散退火
固体粉末渗铝	将工件埋于 Al 粉、 Al_2O_3 粉和 NH_4Cl 混合剂中装箱,于 850 ~ 1050℃ 保持 4 ~ 8h,可获得 50 ~ 400 μm 渗铝层	可采用涂刷防渗剂实现局部防渗
气体渗铝	往密封井式炉中通入 AlCl_3 (或 AlBr_3) 和 H_2 ,在 850 ~ 1050℃ 保持	
热喷涂渗铝	用热喷涂或静电喷涂方法,在工件表面涂覆一层铝,然后加热扩散渗铝	
电泳沉积渗铝	用电泳法将铝粉涂覆在工件表面,然后加热扩散渗铝	
料浆渗铝	将固体渗铝粉末用粘结剂调成料浆,涂覆在工件表面,然后加热扩散渗铝	

表 12-214 常用粉末渗铝剂及渗铝工艺

序号	渗剂成分(质量分数)(%)	工艺参数		渗层深度 / μm
		温度/℃	时间/h	
1	铝铁合金粉 99 + NH_4Cl 1	950 ~ 1050	5 ~ 8	600 ~ 700
2	铝铁合金粉 40 ~ 80, NH_4Cl 0.5 ~ 2,余为 Al_2O_3	850 ~ 1050	6 ~ 12	250 ~ 600
3	铝铁合金粉 35, Al_2O_3 65,氟化氢钾 0.5	960 ~ 980	6	400
4	铝粉 15, Al_2O_3 85, NH_4Cl 0.5,氟化氢钾 0.5	950	6	400
5 ^①	铝粉 5, NH_4Cl 0.1,余为 Al_2O_3	1000		

① 用于 Ni 基、Co 基合金的表面保护。

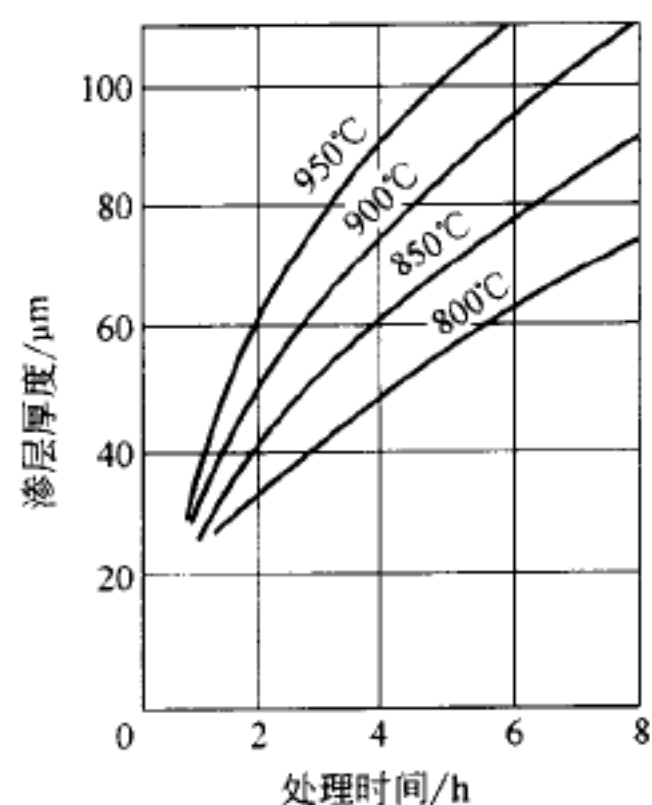


图 12-218 渗铝温度和时间与渗层厚度的关系

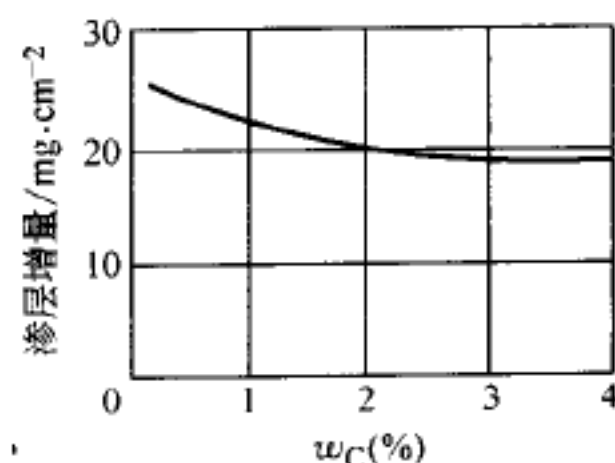


图 12-219 钢中碳含量对渗铝层厚度的影响

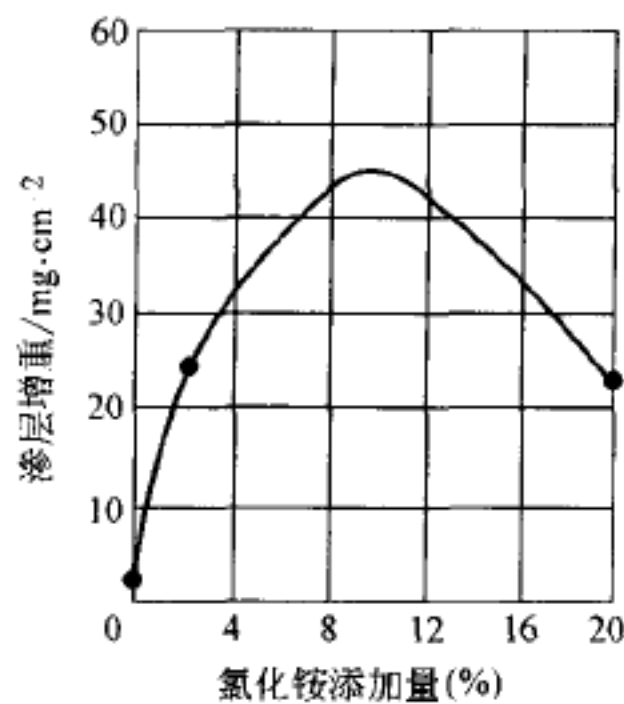


图 12-220 渗铝剂中氯化铵含量与渗层厚度的关系

表 12-215 常用的粉末渗锌剂及处理工艺

渗剂成分 (质量分数) (%)	处理工艺			备 注
	温度 /℃	时间 /h	渗层深度 /μm	
Zn(工业锌粉) 97 ~ 100 + NH ₄ Cl 0 ~ 3	390 ± 10	2 ~ 6	20 ~ 80	在静止的渗箱中 渗锌速率仅为可倾 斜、滚动的回转炉中 的 $\frac{1}{3}$ ~ $\frac{1}{2}$; 渗锌可 在 340 ~ 440℃ 进行
锌粉 50 ~ 75 + 氧化铝(氧化锌) 25 ~ 50; 另加 NH ₄ Cl 0.05 ~ 1	340 ~ 440	1.5 ~ 8	12 ~ 100	温度低于 360℃, 色泽银白, 表面光亮 高于 420℃ 呈灰色 且表面较粗糙
Zn 粉 50 + Al ₂ O ₃ 30 + ZnO 20	380 ~ 440	2 ~ 6	20 ~ 70	

3. 多元共渗(表 12-216 ~ 表 12-224)

表 12-216 渗硅、钛、铌、钼、锰的方法及性能

	方法	渗剂成分(质量分数,%)及工艺	渗层组织及性能
渗 硅	粉末法	硅铁 75% ~ 80%, Al ₂ O ₃ 15% ~ 20%, 1050 ~ 1200℃ × 6 ~ 10h, 渗层厚度: 90 ~ 900μm	渗硅层组织通常为硅在 α 铁中的固溶体, 有时分为两层, 外层为 Fe ₃ Si (α'), 内层为含硅的 α 固溶体 渗硅层往往多孔, 在 170 ~ 200℃ 油中浸煮后, 有较好的减摩性能, 渗硅能提高钢的抗氧化性能, 但较渗铬、渗铝差。渗硅层在海水、硝酸、硫酸及大多数盐及稀碱中有良好的耐蚀性, 但由于渗硅层多孔, 容易出现点蚀, 甚至深疮腐蚀。低硅钢片渗硅后, 硅含量可提高到 7% (质量分数) 左右, 铁损明显降低
		硅铁 80%, Al ₂ O ₃ 8%, NH ₄ Cl 12%, 950℃ × 2 ~ 3h, 多孔渗硅层	
	熔盐法	(50% BaCl ₂ + 50% NaCl) 80% ~ 85%, 硅铁 (15% ~ 80%), 1000℃ × 2h, 10 钢, 渗层厚度: 0.35mm	
		(2/3Na ₂ SiO ₃ + 1/3NaCl) 65%, SiC 35%, 950 ~ 1050℃ × 2 ~ 6h, 渗层厚度: 0.05 ~ 0.44mm	
	熔盐电解法	Na ₂ SiO ₃ 100%, 1050 ~ 1070℃, 1.5 ~ 2.0h, 电流密度 0.20 ~ 0.35A/cm ² 可获得无孔隙渗硅层	
	气体法	硅铁(或 SiC), HCl(或 NH ₄ Cl) 也可外加稀释气, 950 ~ 1050℃	
		SiCl ₄ , H ₂ (或 N ₂ , Ar) 950 ~ 1050℃	
		SiH ₄ , H ₂ (或 NH ₃ , Ar) 950 ~ 1050℃	

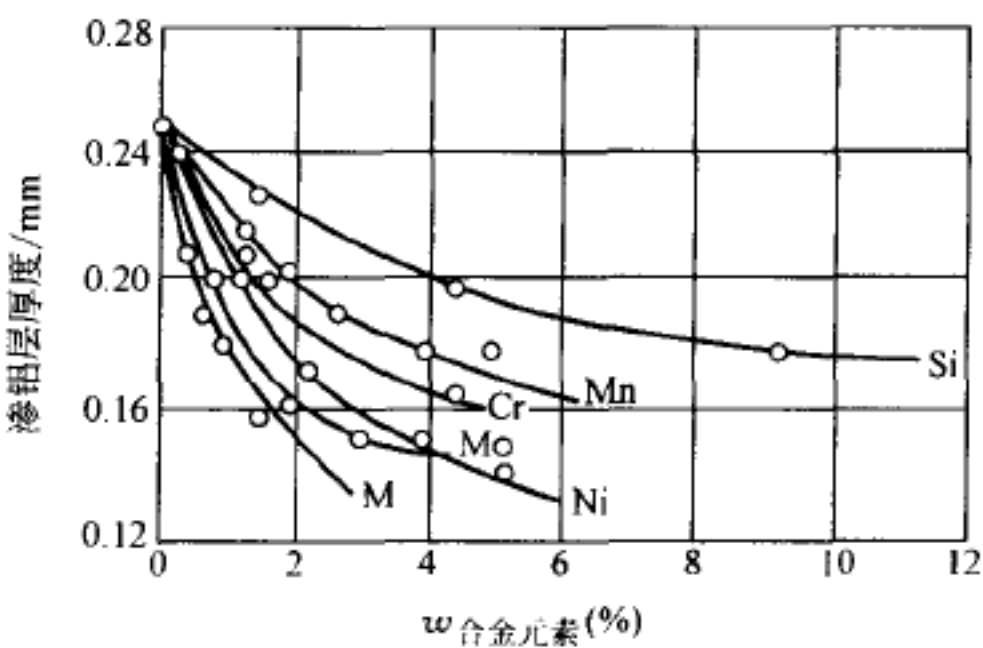


图 12-221 钢中合金元素含量对渗层厚度的影响

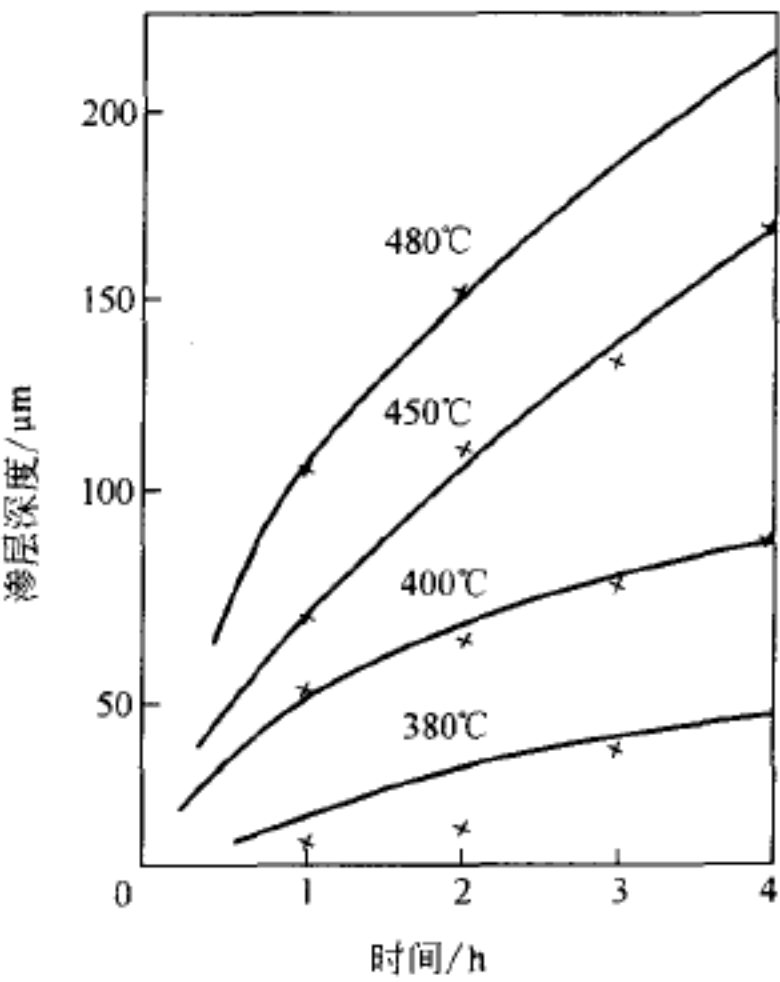


图 12-222 粉末渗锌温度及时间对渗层厚度的影响

(续)

	方法	渗剂成分(质量分数,%)及工艺	渗层组织及性能
渗钛	粉末法	TiO ₂ 50%, Al ₂ O ₃ 29%, Al18%, (NH ₄) ₂ SO ₄ 2.5%, NH ₄ Cl0.5%, T8 钢 1000℃, 4h, 渗层厚度:20μm	1. 渗钛层组织 工业纯铁和 08 钢; TiFe + 含钛 α 固溶体; 中高碳钢 TiC 2. 性能及应用 TiC 的硬度为 3000 ~ 4000HV, 具有很高的耐磨性, 可用于刀具、模具 渗钛层在海水, 稀 HNO ₃ 、碱液、酒石酸、醋酸中具有良好的耐蚀性能, 可应用于海洋工程、化工、石油等多种领域 3. 适用材料 钢、铸铁、硬质合金
		钛铁 75%, CaF ₂ 15%, NaF4%, HCl6%, 1000 ~ 1200℃, 10h 以内	
	熔盐电解法	K ₂ TiF ₆ 16% + NaCl84%, 添加海绵钛, 石墨作阳极, 盐浴面上 Ar 保护 850 ~ 900℃, 电压 3 ~ 6V, 电流密度:0.95A/cm ²	
		Ti ₄ (或 TiI ₄ , TiBr ₄), H ₂ , 750 ~ 1000℃	
	气体法	海绵钛与工件同置于真空炉内, 彼此不接触, 真空度:0.5 ~ (1 ~ 10) ⁻² Pa 900 ~ 1050℃ 举例:1050℃ × 16h 下, 08 钢可得 0.34mm 渗钛层, 45 钢可得 0.08mm 渗钛层。12Cr18Ni10Ti 可得 0.12mm 渗钛层	
渗铌	粉末法	Nb50%, Al ₂ O ₃ 49%, NH ₄ Cl1%, 950 ~ 1200℃	低碳钢, α 固溶体中高碳钢 NbC 或 Nb + α 固溶体耐磨、抗蚀
	气体法	铌铁, H ₂ , HCl, 1000 ~ 1200℃	
		NbCl ₅ , H ₂ (或 Ar), 1000 ~ 1200℃	
渗钒	粉末法	钒铁 60%, 高岭土 37%, NH ₄ Cl3%, 1000 ~ 1100℃	低碳钢:α 固溶体 中高碳钢:VC 或 VC + α 耐 HNO ₄ 50%、H ₂ SO ₄ 98%、NaCl10% 腐蚀, VC 很耐磨
	气体法	V(或钒铁), VCl, H ₂ , 1000 ~ 1200℃	
渗锰	粉末法	Mn(或锰铁)50%, Al ₂ O ₃ 49%, NH ₄ Cl1%, 950 ~ 1150℃	低碳钢:α 固溶体 中高碳钢:(MnFe) ₃ C 或 (Mn, Fe) ₃ C + α 渗锰层耐磨, 在 NaCl10% 中具有耐蚀性
	气体法	Mn(或锰铁), H ₂ , HCl, 800 ~ 1100℃	

表 12-217 硼铝共渗工艺

工艺方法	渗剂成分(质量分数)(%)	工艺参数	渗层厚度/μm		
			纯铁	45 钢	T8
粉末法	Al ₂ O ₃ 70%, B ₂ O ₃ 16%, Al13.5%, NaFO.5%	950℃ × 4h	175	140	125
	Al ₂ O ₃ 70%, B ₂ O ₃ 13.5%, Al16%, NaFO.5%	1000℃ × 4h	280	230	200
熔盐电解法	Na ₂ B ₄ O ₇ 19.9%, Al ₂ O ₃ 20.1%, Na ₂ O · K ₂ O60%, 电流密度 0.3A/cm ²	950℃ × 4h	130		
熔盐法	硼砂, 铝铁粉, 氟化铝, 碳化硼, 中性盐	840 ~ 870℃ × 3 ~ 4h	70 ~ 130		
膏剂法	Al8%, B ₄ C72%, Na ₃ AlF ₆ 20%、粘结剂	850℃ × 6h	50		

表 12-218 硼铬共渗与复合渗的渗剂与配方

工艺方法	渗剂配方(质量分数)(%)	工 艺
共渗	粉末法	无定形硼 5 + 铬粉 63.5 + Al ₂ O ₃ 30 + NH ₄ 11.5
	盐浴电解法	Na ₂ B ₄ O ₇ 50 ~ 52, Cr ₂ O ₃ 5 ~ 3, SiCl ₄ 10, B ₄ C5, Na ₃ AlF ₆ 20, KCl10
		(850 ~ 900℃) × 2h, 阴极电流密度(0.1 ~ 0.2)A/cm ²

(续)

工艺方法		渗剂配方(质量分数)(%)	工 艺
复合渗	膏剂法渗硼 + 粉末法渗铬	渗硼膏剂: B_4C 10, Na_3AlF_6 10, CaF_2 80	$900^{\circ}C \times 1 \sim 2h$
		铬铁合金 50, 氧化铝 48, NH_4Cl 2	$1050^{\circ}C \times 3h$
	粉末渗铬 + 电解渗硼	渗铬: 铬铁 50, Al_2O_3 43, NH_4Cl 7	$1050^{\circ}C \times 6h$
		渗硼盐浴: 硼砂 50, B_4C 50	$900^{\circ}C \times 2h$, 电流密度 $0.24A/cm^2$

表 12-219 混合物成分和硼铬共渗规范对各种材料渗层的厚度、相组成和硬度的影响

渗入方法	混合物的成分 (质量分数)(%)	处理规范		材料	渗层 厚度 μm	渗层的相组成	渗层显微硬度 HV		
		温度 $^{\circ}C$	时间 /h				外部	中间	内部
电解同时 渗入 ($i = 0.1 \sim 0.2A/cm^2$) 顺序渗 入: 粉末渗 铬电解渗硼 ($i = 0.24A/cm^2$)液体同 时渗入	1. $Na_2B_4O_7$ 90 ~ 95, Cr_2O_3 10 ~ 5	800 ~ 1000	2 ~ 4	纯铁	—	(Fe, Cr)B, (Fe, Cr) ₂ B	2250 ~ 1900	1900	—
	2. B_2O_3 75 ~ 80, NaF 22 ~ 12, Cr_2O_3 3 ~ 8	800 ~ 1000	1 ~ 6	45 钢	80	(Fe, Cr)B, (Fe, Cr) ₂ B、碳化物	1900	1600	400
	$FeCrSO, Al_2O_3, NH_4Cl$ 7 硼砂或 50 硼砂, B_4C 50	1500	6	CrWMn	45	$Cr_{23}C_6$ 、 Cr_7C_3 、 CrB_2 、 Cr_2B 、(Fe, Cr) ₂ B、碳化物	1550	1100	520
	$Na_2B_4O_7$ 70 ~ 80, Cr_2O_3 5 ~ 15, CK15 ~ 25	900 ~ 1050	2 ~ 4	纯铁 45 钢	100 ~ 150	(Fe, Cr)B, (Fe, Cr) ₂ B	2300	1850	—
固体同时 渗入	1. B_{10} ~ 30, Cr90 ~ 70, 活性剂	900 ~ 1100	6 ~ 10	钢、合金	10 ~ 50	(Fe, Cr)、(Fe, Cr) ₂ B	2200	1850	—
	2. B_5 , Cr63.5, Al_2O_3 30, NH_4Cl 1.5	1000	8	GCr15	80	(Fe, Cr) ₃ ·(C, B) ₂ ;	2000	1800	480
		1000	8	4C413	30	(Fe, Cr) ₂₃ ·(C, B) ₆	1800	1500	500
	3. B_4C 98.5, Cr15 (粉末), 活性剂	950	6	45 钢	180	(Fe, Cr) ₂ B, (Fe, Cr)B(7.52% Cr)	2250	1850	—
		1050	6	45 钢	370	(Fe, Cr) ₂ B(16.4% Cr)	2250	1850	—
	4. CrB_2 47, 惰性添 加剂 50, 活性剂 3	900	4	40Cr	80	(Cr, Fe)B, (Fe, Cr) ₂ B(10% Cr)	1900	1600	—
		1000	4	40Cr	200				
		1100	4	40Cr	280				
	5. 糊膏: B_4C 58, $Na_2B_4O_7$ 38, Cr3 (粉 末), NH_4Cl (粘结剂 —BΦ-2 胶在丙酮中 的溶液)	1000 (电热)	0.2	T8	40	(Fe, Cr)(B, C)、 (Fe, Cr) ₂ B	3000	2600	—
	6. 糊膏: Cr_2O_3 、Al、 B、NaCl、NaF、 Na_3AlF_6 (粘结剂——乙基硅 酸盐, BΦ-2 溶液、硝 基纸浆在丙酮中的溶 液), 在 $100^{\circ}C$ 烘干	1200 (高频电流)	0.25	钢 铸铁	0.1 ~ 1.5mm 0.1 ~ 1.5	(Fe, Cr) ₂ B Cr 和 B 在 αFe 中的 固溶体、碳化物	1100 —	800 —	600 —

(续)

渗入方法	混合物的成分 (质量分数)(%)	处理规范		材料	渗层 厚度 / μm	渗层的相组成	渗层显微硬度 HV		
		温度 / $^{\circ}\text{C}$	时间 /h				外部	中间	内部
浮渣粉末	Cr、CrB ₂ ——涂料。 Cr、B、Al ₂ O ₃ 和活性 剂的粉末状混合物。 在该混合物中或在保 护气氛中加热	900 ~ 1000	2 ~ 6	钢和 合金	50 ~ 300	(Cr、Fe)B、(Cr、 Fe) ₂ B	1500	—	—
熔镀	硼化铬, 随后渗硼 或退火	900 ~ 1000	4 ~ 6	钢和 合金	—	(Cr、Fe)B、(Cr、 Fe) ₂ B、(Me) ₂₃ C ₆	1000 (固溶 体); 1700 ~ 1400 (夹杂 物)	—	—

表 12-220 混合物成分和硼钛共渗规范对各种材料渗层的厚度、相组成和硬度的影响

渗入方法	混合物的成分 (质量分数)(%)	化学热处理规范		材料	渗层 厚度 / μm	相组成或合金 元素含量	渗层显微硬度 HV		
		温度 / $^{\circ}\text{C}$	时间 /h				外部	中间	内部
固体处理方法									
同时渗入	1. B40 ~ 60, Ti30 ~ 60 + 活性剂 (可以添加达 Al ₂ O ₃ 50)	900 ~ 1050	6 ~ 15	纯铁	< 100	Fe ₂ B(单个针), 固溶体, 钛化铁	1800	1600	—
				合金	< 70	B 和 Ti 在 Ni 中的固溶 体, 硼化钛	650	950 ~ 1300	400
	2. B ₄ C10 ~ 25, FeTi55 ~ 65, Al ₂ O ₃ 20, Na ₂ -B ₄ O ₇ 3, NH ₄ Cl1, NaCl1	1100	6	纯铁, T8	50		2100	300	—
					25		1600	300	—
顺序渗入	1. 渗硼时:	1050(B)	6	纯铁	\approx 400	FeTi ₂ , TiB ₂ , Fe ₂ B, B 和 Ti 在铁中的固溶体	3200 ~ 3400	1900 ~ 1500	450
	B ₄ C84, Na ₂ B ₄ O ₇ 16 另加 活性剂	1000(Ti)	2	纯铁					
		1000(B)	< 15	合金	\approx 200	—	1900 ~	1400 ~	—
		900(Ti)	< 12	合金		—	1800	1000	—
	渗钛时:	1050(B)	2	45 钢	\approx 320	FeTi ₂ , TiB ₂ , B 和 Ti 在 Fe 中的固溶体	—	2500 ~ 2000	200
	Ti70(或含 Ti47 的钛铁)	1100(Ti)	2	纯铁					
	Al ₂ O ₃ 25, NH ₄ Cl5								
	2. 渗钛时:	1000(Ti)	4	纯铁	—	Fe ₂ B, FeTi ₂ , 硼化物夹杂	1000	800	—
	Ti70(或钛铁), Al ₂ O ₃ 25, NH ₄ Cl5	900(B)	4	纯铁					
	渗硼时:	900(Ti)	12	合金	60	金属间化合物, 以 Ni 为 基的固溶体	700 ~ 800	650 ~ 1000	—
B ₄ C84, Na ₂ B ₄ O ₇ 16 和活 性剂	900(B)		合金					—	

(续)

渗入方法	混合物的成分 (质量分数)(%)	化学热处理规范		材料	渗层 厚度 / μm	相组成或合金 元素含量	渗层显微硬度 HV		
		温度 / $^{\circ}\text{C}$	时间 /h				外部	中间	内部
电解处理方法									
同时渗入	($i = 0.2 \sim 0.4\text{A}/\text{cm}^2$), $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 90 ~ 70, TiO_2 10 ~ 30, Ti(海绵、粉末)	950 ~ 1050	4 ~ 6	钢, 合金	—	—	—	—	—
浮渣、浮渣-粉末或粉末处理法									
	悬浮液: B, TiB_2 , 粘结剂: 在 TiB_2 43, Al_2O_3 50, 活性剂 3 的粉末中加热	1000	4	40Cr	75	(Fe, Ti) B, Fe_2B , (B + Ti) $\approx 20\%$	—	—	—

表 12-221 混合物成分和硼铝共渗规范对各种材料渗层的厚度、相组成和硬度的影响

渗入方法	混合物的成分 (质量分数)(%)	处理规范		材料	渗层 厚度 / μm	相组成	渗层显微硬度 HV		
		温度 / $^{\circ}\text{C}$	时间 /h				外部	中间	内部
电解(电流 密度 $0.1 \sim 0.3 \text{ A/cm}^2$)	1. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 70 \sim 80$, $\text{ZrO}_2 5 \sim 10$, $\text{NaF} 20$ (或 $\text{NaCl} 7 \sim 10$)	900	5	Q235	224	(Fe, Zr)B, (Fe, Zr) $_2$ B, Zr_2B	1900	2000	300
电解(电流 密度 $0.1 \sim 0.3 \text{ A/cm}^2$)	2. $\text{KF} 75\%$ (mol), ($3\text{K}_2\text{ZrF}_6$, $2\text{B}_2\text{O}_3$) 25% (mol)	760 ~ 1000	2 ~ 5	钢, 合金	—	—	—	—	—
液体非电 解	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 65$, $\text{B}_2\text{O}_3 10$, 硅铝合金 25	950	4	45 钢	165	(Fe, Zr)B, (Fe, Zr) $_2$ B	2100	1700	300
浮渣、浮 渣-粉末或 粉末	悬浮液: B, ZrB_2 、粘 结剂。在 $\text{ZrB}_2 43$, $\text{Al}_2\text{O}_3 50$, 3 活性剂的 粉末混合物中加热	1000	4	40 钢	120	(Fe, Zr)B, (Fe, Zr) $_2$ B	1800	—	—
顺序渗入	工业用的 B_4C 和活 性剂	950	5	含 Zr 1.5% 的钢	75	(Fe, Zr)B, (Fe, Zr) $_2$ B	2250	1900	—

表 12-222 渗剂中 B、Si 含量对渗层组织的影响($100^{\circ}\text{C} \times 6\text{h}$)

渗剂成分(质量分数)(%)	渗层组织
$\text{B}_4\text{C} 80$, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 15$, $\text{Si} 4.75$, $\text{NH}_4\text{Cl} 0.25$	FeB, Fe_2B
$\text{B}_4\text{C} 75.5$, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 14.5$, $\text{Si} 9.5$, $\text{NH}_4\text{Cl} 0.5$	FeB, Fe_2B , FeSi
$\text{B}_4\text{C} 67$, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 13$, $\text{Si} 9$, $\text{NH}_4\text{Cl} 1$	Fe_2B , FeSi
$\text{B}_4\text{C} 63$, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 12$, $\text{Si} 23.5$, $\text{NH}_4\text{Cl} 1.5$	FeSi, Fe_2B

表 12-223 铝铬共渗工艺

渗剂成分(质量分数)(%)	钢材	工艺参数	渗层厚度 /mm	渗层元素含量(质量分数)(%)	
				Cr	Al
AlFe 粉 75, CrFe 粉 25, NH_4Cl 1.5	10 钢	$1025^\circ\text{C} \times 10\text{h}$	0.53	6	37
AlFe 粉 50, CrFe 粉 50, NH_4Cl 1.5	10 钢	$1025^\circ\text{C} \times 10\text{h}$	0.37	10	22
AlFe 粉 20, CrFe 粉 80, NH_4Cl 1.5	10 钢	$1025^\circ\text{C} \times 10\text{h}$	0.23	42	3

表 12-224 含铬共渗与复合渗

工艺	渗层性能特点	渗剂成分 (质量分数)(%)	处理工艺		渗层厚度 / μm
			温度/ $^\circ\text{C}$	时间/h	
Cr-Si 共 渗	提高耐磨(包括冲蚀磨损)、耐 蚀(气蚀、气体腐蚀、电化学腐蚀) 能力,渗层具有高的热稳定性和 耐急冷急热性。抗高温氧化性和 耐蚀性优于渗铬层,韧性优于渗 硅层。渗层中含 $w_{\text{Cr}}20\%$ 、 $w_{\text{Si}}5\%$	铬 粉 53, 硅 粉 3, Al_2O_3 42, NH_4Cl 2。通 $\text{H}_2 + \text{HCl}$ 气体	1000	10	150
			1000	20	200 ~ 250
Cr-Ti 共 渗	提高抗氧化、耐腐蚀、耐磨及耐 气蚀性。还可用于提高热稳定 性。其抗高温氧化性及耐磨性均 高于渗铬层。渗层表面硬度 2200HV	Cr_2O_3 粉 70, TiO_2 粉 30, 另加 AlH_5 (还原剂)	1100	4	30 ~ 60
Cr-Ti/V/ Nb 复合渗	在高硬度的 VC、TiC、NbC 与基 体中间是碳化铬,使渗层硬度逐 渐降低,从而使其抗冲击剥落性、 抗蚀性高于单一碳化物层	渗铬(或镀铬)后,在一定成分 的硼砂盐浴中扩散渗入钒、钛、 铌,在表层形成复合碳化物层。 如含钒盐浴:无水硼砂 90 + 钒 10 或钒铁 10(含钒 67)	900 ~ 1050	2 ~ 8	10 ~ 20
Cr-RE 共 渗	提高渗铬速度,改善渗铬层质 量。少量稀土渗入渗层中,使渗 铬层的耐腐蚀、抗高温氧化、韧 性、耐磨性都得到了提高	渗铬盐浴中加入适量的稀土添 加剂	950	4 ~ 8	10 ~ 15
C-Cr 复 合渗	先渗碳后渗铬可增加碳化物层 厚度,渗层下没有贫碳区。C-Cr 复合渗层具有高硬度、疲劳强度 (包括腐蚀疲劳强度)、耐磨性以 及热稳定性和在各种介质中的耐 蚀性(包括在铝合金、锌合金熔体 的侵蚀性)	—	—	—	—
Cr-V 共 渗后再渗 N	渗层抗高温氧化、磨损性比渗 铬或铬钒共渗好	Cr-V 共渗后气体渗氮	1050	8	共渗层 100 ~ 400,
			540	6	氮化物层 10 ~ 20

第 13 章 气相沉积技术

13.1 典型涂层的特性 (表 13-1 ~ 表 13-3)

表 13-1 几类超硬化合物层的主要特性

类别	沉积层名称	主要特性
碳化物	TiC, VC, W ₂ C, WC, MoC, Cr ₃ C ₂ , B ₄ C, TaC, NbC, ZrC, HfC, SiC	高硬度, 高耐磨, 部分碳化物 (如碳化铬) 耐蚀
氮化物	TiN, VN, BN, ZrN, NbN, HfN, Cr ₂ N, CrN, MoN, (Ti, Al) N, Si ₃ N ₄	立方 BN TiN、VN 等耐磨性能好; TiN 色泽如金且比镀金层耐磨, 装饰性好
氧化物	Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , ZrO ₂ , CuO, ZnO, SiO ₂	耐磨, 特殊光学性能, 装饰性好
碳氮化合物	Ti (C, N), Zr (C, N)	耐磨, 装饰性好
硼化物	TiB ₂ , VB ₂ , Cr ₂ B, TaB, ZrB, HfB	耐磨
硅化物	MoSi ₂ , WSi ₂	抗高温氧化, 耐蚀
金属及非金属元素	Al, Cr, Ni, Mo, C (包括金刚石及类金刚石)	满足特殊光学、电学性能或赋予高耐磨性

表 13-2 常用化合物沉积层的沉积温度

涂层名称	作用气体	沉积温度/℃	涂层名称	作用气体	沉积温度/℃
VC	VCl ₄ /C ₆ H ₅ CH ₃ /H ₂	1500 ~ 2000	Al ₂ O ₃	AlCl ₃ /H ₂ /CO ₂	800 ~ 1300
Si ₃ N ₄	SiCl ₄ /NH ₃	1200 ~ 1600	W ₂ C	WF ₆ /C ₆ H ₆ /H ₂	325 ~ 600
SiC	SiHCl ₃ /CH ₄ /H ₂	1000 ~ 1400	WC	WCl ₆ /CH ₄	900 ~ 1100
	CH ₃ SiCl ₂	1000 ~ 1400	HfC	HfCl ₄ /CH ₄ /H ₂	1000 ~ 1300
TiC	TiCl ₄ /CH ₄ /H ₂	800 ~ 1000	BN	BCl ₃ /NH ₃	1750 ~ 1950
TiN	TiCl ₄ /N ₂ /H ₂	650 ~ 700		BT ₃ /NH ₃	1750 ~ 1950
B ₄ C	BCl ₃ /CH ₄ /H ₂	≈ 1300			

表 13-3 常用超硬化合物沉积层的主要性能

沉积层主要相	晶体结构	硬度 HV	密度 /g·cm ⁻³	熔点/℃	热导率 /J·(m·℃) ⁻¹	热膨胀系数 /×10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹	色泽
B ₄ C	六方	4900 ~ 5000	2.52	2350	0.29 ~ 0.84	4.5	灰黑色
B-SiC	闪锌矿结构	2800	3.21	2700	0.42	3.9	
TiC	面心立方	2980 ~ 3800	4.9	3180	0.17	7.61	亮灰色
VC	面心立方	2800	5.7	2830	0.38	6.5	
HfC	面心立方	2700	12.7	3890	0.21	6.73	
ZrC	面心立方	2600	6.5	3530	0.21	6.93	灰色
NbC	面心立方	2400	7.8	3480	0.14	6.84	亮褐
WC	六方	2000 ~ 2400	15.8	2730	0.45	6.2	灰色
TaC	面心六方	1800	14.5	3780	0.22	6.61	金褐
Mo ₂ C	六方	1800	9.2	2400	0.22	6.0	

(续)

沉积层主要相	晶体结构	硬度 HV	密度 /g·cm ⁻³	熔点/℃	热导率 /J·(m·℃) ⁻¹	热膨胀系数 /×10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹	色泽
Cr ₃ C ₂	正交	1300	6.7	1890	0.19	10.3	灰色
TiN	面心立方	2400	5.4	2930	0.29	9.4	金黄
VN	面心立方	1500	6.1	2050	0.11	8.1	金黄
HfN	面心立方	2000	14.0	2700	0.11	6.9	黄褐
ZrN	面心立方	1900	7.3	2980	0.11	6.0	亮黄
NbN	面心立方	1400	8.4	2300	0.29	10.1	
TaN	面心立方	1300	14.1	3090	0.09	3.6	灰色
BN	立方、六方	4700		1200	0.10	4.8	
C-BN	面心立方	4695 ~ 8600	3.48	1500 (热解)		4.7	白色
Si ₃ N ₄	六方	1720	3.19	1900	0.106	2.5	无色
Al ₂ O ₃	菱方	1910	3.9	2015		8.3	白色
金刚石	向心立方	7000 ~ 10000	3.5	3550		1	无色
非金刚石	非晶态	4000 ~ 5000	2.3	3730			

注:1. 钛的熔点 1660℃, 硬度 80 ~ 100HV; 钒的熔点 1700℃, 硬度 264HV; 铌的熔点 2450℃, 硬度 45 ~ 125HV。

2. Al₂O₃ 中含其他氧化物时呈不同色泽: 含 w_{TiO_2} 0.5% 为橙红色; 含 $w_{\text{Cr}_2\text{O}_3}$ 0.01% ~ 0.5% 为桃红色; 含 $w_{\text{V}_2\text{O}_5}$ 2% ~ 3% 为紫色。

13.2 化学气相沉积工艺及性能(表 13-4 ~ 表 13-6 和图 13-1 ~ 图 13-3)

表 13-4 常见 CVD 薄膜和涂层

沉积材料	衬底	反应气体	沉积温度/℃	结晶特性 ^①
Si	单晶硅	SiCl ₂ H ₂ , SiCl ₃ H, 或 SiCl ₄ + H ₂	1050 ~ 1200	E
Si		SiH ₄ + H ₂	600 ~ 700	P
Ge	单晶锗	GeCl ₄ 或 GeH ₄ + H ₂	600 ~ 900	E
SiC	单晶硅及碳纤维等	SiCl ₄ , CH ₃ SiCl ₃ , 甲苯, H ₂	1100	P
AlN	蓝宝石	AlCl ₃ , NH ₃ , H ₂	1000	E
In ₂ O ₃ :Sn	玻璃	In 的螯合物	500	A
ZnS	GaAs, 蓝宝石	DEZn, H ₂ S, H ₂	825	E
CdS	GaAs, 蓝宝石	DECd, H ₂ S, H ₂	690	E
Al ₂ O ₃	Si	Al(CH ₃) ₃ + O ₂	275 ~ 475	A
	硬质合金	AlCl ₃ , CO ₂ , H ₂	850 ~ 1100	A
Al ₂ O ₃	Si	SiH ₄ + O ₂	450	A
		SiCl ₂ H ₂ + 2N ₂ O	900	
Si ₃ N ₄	SiO ₂	SiCl ₂ H ₂ + NH ₃	750	A
SiNH	SiO ₂	SiH ₄ + NH ₃ (等离子体)	300	A
TiO ₂	石英	Ti(OC ₂ H ₅) ₄ + O ₂	450	A
TiC	钢, 硬质合金	TiCl ₄ , CH ₄ , H ₂	1000	P
TiN	钢, 硬质合金	TiCl ₄ , N ₂ , H ₂	1000	P
BN	钢	BCl ₃ , NH ₃ , H ₂	1000	P
TiB ₂	钢	TiCl ₄ , BCl ₃ , H ₂	> 800	P
金刚石	Si, Mo, 硬质合金, 石英玻璃等	C-H-O 系统, C 可由任何含碳气体和挥发性液体化合物提供	140 ~ 1100	P 或 E
DLC	Ge, 石英, 钢等	C ₆ H ₆ (r, f 等离子体)	室温	A
热解碳	石墨, 核聚变反应器内壁等	CH ₄ , C ₂ H ₂ , C ₃ H ₆ 等	300 ~ 1500	P
各种金属薄膜		卤素化合物, 羰基化合物, 烷基化合物, 及有机金属络合物		

① A—非晶膜, P—多晶膜, E—单晶外延膜。

表 13-5 等离子体 CVD 沉积的薄膜材料及其应用

沉积材料	反应气体	沉积温度/℃	应 用	发展现状
α-Si	SiH ₄ -H ₂	250	半导体光电器件	工业生产
外延硅	SiH ₄	750	半导体器件	R&D
Si ₃ N ₄	SiH ₄ -N ₂ -NH ₃	300	钝化膜	工业生产
SiO ₂	SiH ₄ -N ₂ O	300	钝化膜; 光学纤维	工业生产
BSG	SiH ₄ -TEOS-B ₂ H ₆ -PH ₃	355	钝化膜	半工业生产
W	WF ₆	250 ~ 400	集成电路的导线	R&D
WSi ₂	WF ₆ -SiH ₄	230	集成电路的导线	半工业化生产
TiSi ₂	TiCl ₄ -SiH ₄	380 ~ 450	集成电路的导线	半工业化生产
TiC	TiCl ₄ -C ₂ H ₂	500	切削工具涂层	R&D
TiN	TiCl ₄ -NH ₃	500	切削工具涂层	R&D
金刚石膜	H ₂ -碳氢化合物	140 ~ 1200	电子、热学、光学、工具等等	R&D
DLC(类金刚石膜)	H ₂ -碳氢化合物	300	摩擦磨损、光学	半工业化生产

注：R&D—研究与发展。

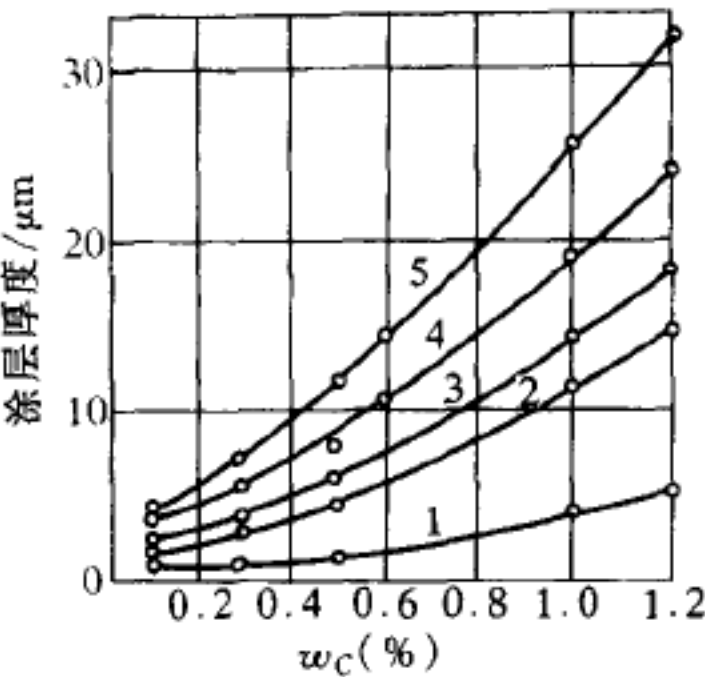


图 13-1 钢中的碳含量与涂层厚度的关系

1—0.5h 2—1h 3—2h 4—4h 5—8h

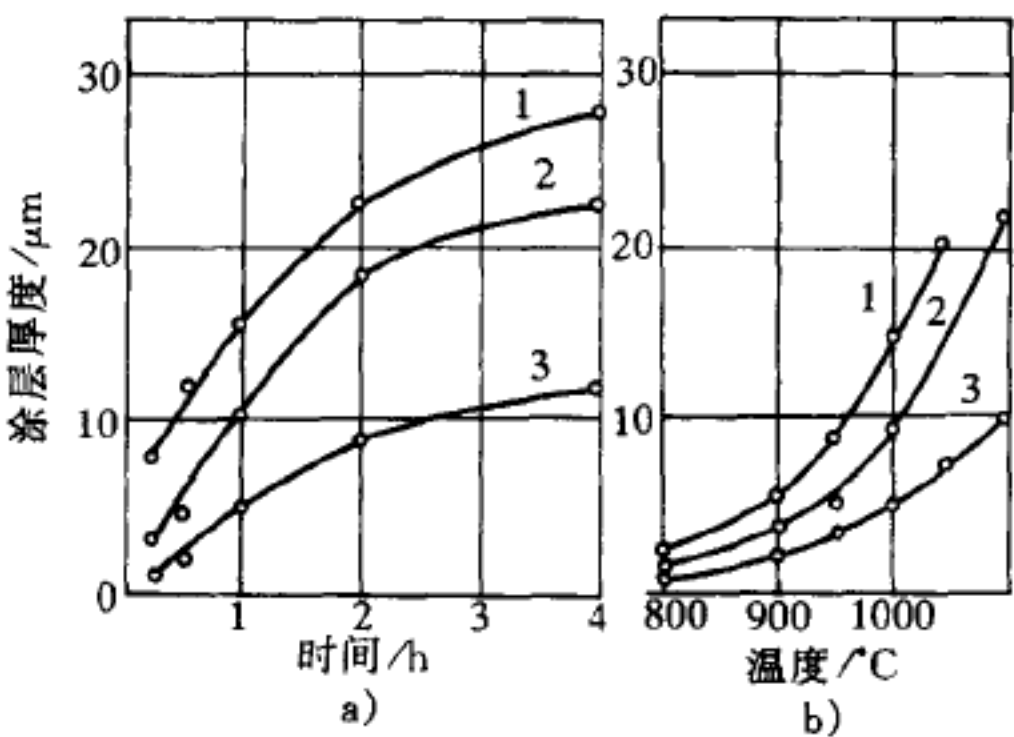


图 13-2 沉积时间及温度与涂层厚度的关系

1—Ti2 2—GCr15 3—Cr12Mo

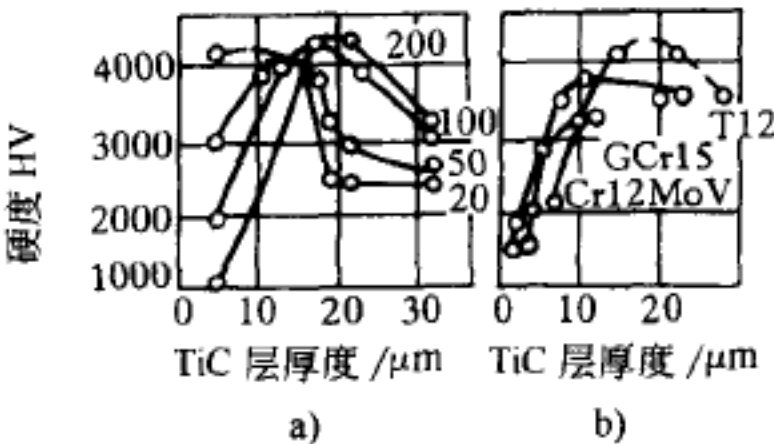


图 13-3 T12 钢覆盖 TiC 层的厚度与硬度关系曲线

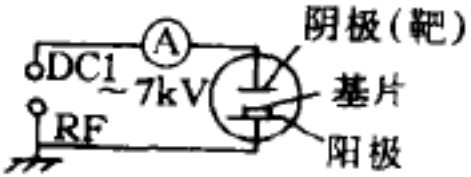
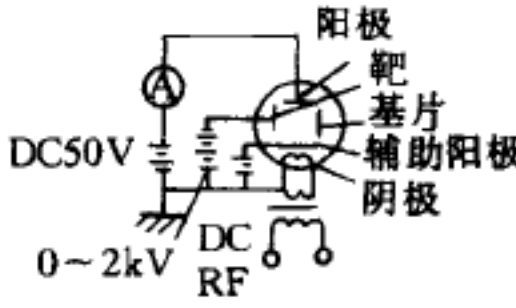
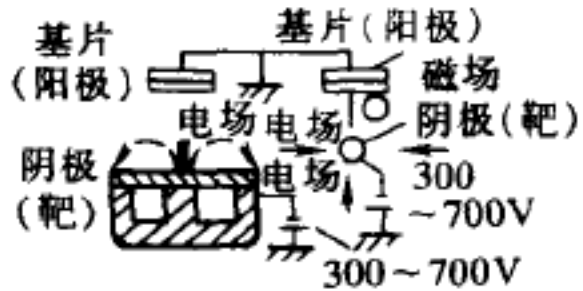
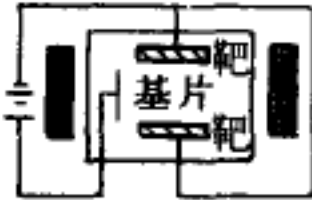
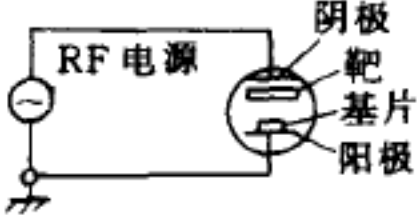
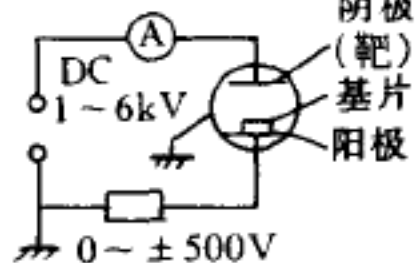
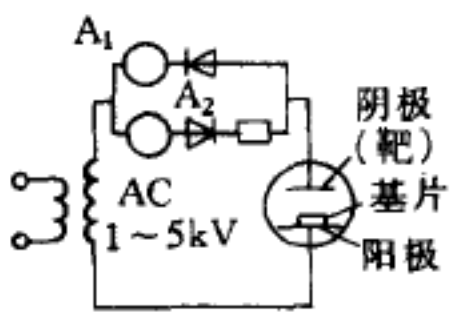
a)T12 钢,图中曲线上数字为硬度载荷
b)显微硬度载荷为 2N(200gf)

表 13-6 常见碳化物的性质和制备方法

碳化物	晶体结构	熔点 / °C	密度 / g·cm ⁻³	膨胀系数 / × 10 ⁻⁶ · °C ⁻¹	硬度 HV	电阻率 / μΩ·cm (20 °C)	热导率 / W·(cm·°C) ⁻¹ (20 °C)	CVD 反应	应用例子
B ₄ C	菱方	2450	2.51	4.5	500	5 × 10 ⁶	0.35	$4\text{BCl}_3 + \text{CH}_4 + 4\text{H}_2 \longrightarrow \text{B}_4\text{C} + 12\text{HCl}$ $4\text{BCl}_3 + \text{CH}_3\text{Cl} + 5\text{H}_2 \longrightarrow \text{B}_4\text{C} + 13\text{HCl}$ $4\text{BCl}_3 + \text{CCl}_4 + 8\text{H}_2 \longrightarrow \text{B}_4\text{C} + 16\text{HCl}$ $2\text{B}_2\text{H}_6 + \text{CH}_4 \longrightarrow \text{B}_4\text{C} + 8\text{H}_2$	陶瓷基复合材料; 喷嘴涂层; 砂轮修整笔; 核反应堆中子控制棒涂层; 中子屏蔽涂层
C ₇ C ₃	三斜	1782	6.9	10		84	0.11	金属氮化物和碳化物在 1000 °C 下反应 $\text{Cr}[(\text{C}_6\text{H}_5)_3\text{C}_3\text{H}_7]_2$ 在 300 ~ 550 °C 的分解反应	抗腐蚀、耐磨损涂层 工具钢涂层的中间层
HfC	fcc	3890	12.6	6.6	290	50	0.08	$\text{HfCl}_4 + \text{CH}_4 \longrightarrow \text{HfC} + 4\text{HCl}$ $\text{HfCl}_4 + \text{CH}_3\text{Cl} + \text{H}_2 \longrightarrow \text{HfC} + 5\text{HCl}$	碳-碳复合材料抗氧化涂层 HfC 晶须 高温合金涂层
NbC	fcc	3500	7.1	6.0	240	60 ~ 150	0.14	$\text{Nb} + \text{CH}_4 \longrightarrow \text{NbC} + 2\text{H}_2$ $\text{NbCl}_5 + \text{CCl}_4 + \frac{9}{2}\text{H}_2 \longrightarrow \text{NbC} + 9\text{HCl}$	含铌钢的硬质保护层 超导应用中的氮碳化物
β-SiC	闪锌矿结构	2700	3.21	3.9	280	10 ~ 100 Ω·cm	1.25	$\text{SiCH}_3\text{Cl}_3 \longrightarrow \text{SiC} + 3\text{HCl}$ $3\text{SiH}_4 + \text{C}_3\text{H}_8 \longrightarrow 3\text{SiC} + 10\text{H}_2$ $6\text{SiH}_4 + \text{C}_6\text{H}_6 \longrightarrow 6\text{SiC} + 15\text{H}_2$	硅外延沉积感应力体涂层和加热元件 聚变堆和核废料容器涂层 高温半导体器件 陶瓷热管涂层 辐射探测器(非晶 SiC) 陶瓷基复合材料 碳-碳复合材料抗氧化涂层 纤维和晶须
TaC	fcc	3880	7.1	5.5	240	40 ~ 175	0.22	$\text{Ta} + \text{CH}_4 \longrightarrow \text{TaC} + 2\text{H}_2$ $\text{TaCl}_4 + \text{CH}_3\text{Cl} + \text{H}_2 \longrightarrow \text{TaC} + 5\text{HCl}$	金属钽的硬质保护层
TiC	fcc	3250		7.6	320	60 ~ 250	0.17	$\text{TiCl}_4 + \text{CH}_4 \longrightarrow \text{TiC} + 4\text{HCl}$ $\text{TiCl}_4 + \text{C} + 2\text{H}_2 \longrightarrow \text{TiC} + 4\text{HCl}$ MOCVD(700 °C)	硬质合金切削工具涂层 滚动轴承涂层 挤压模和喷嘴涂层
Ti(C,N)								$\text{TiCl}_4 + x\text{CH}_4 + \frac{1}{2}(1-x)\text{N}_2 + 2(1-x)\text{H}_2 \longrightarrow$ $\text{TiC}_x\text{N}_{1-x} + 4\text{HCl}$ $\text{TiCl}_4 + 4\text{CH}_3\text{CN} + 4\text{H}_2 \longrightarrow \text{Ti}(\text{CN})_4 + 4\text{CH}_4 + 4\text{HCl}$	化工用泵轴, 轴套, 进给螺杆涂层 塑料模具涂层
α-WC β-WC	六方 fcc	2700	15.8	4.5	180	17	0.28	$\text{WCl}_6 + \text{CH}_4 + \text{H}_2 \longrightarrow \text{WC} + 6\text{HCl}$ $\text{WF}_6 + \text{CH}_3\text{OH} + 2\text{H}_2 \longrightarrow \text{WC} + 6\text{HF} + \text{H}_2\text{O}$ $\text{W}(\text{CO})_6 \longrightarrow \text{W} + 6\text{CO}$	WC 粉末 超细孔隙碳的涂层(催化剂)
ZrC	fcc	3450	6.57	6.0	200	57 ~ 75	0.20	$\text{ZrBr}_4 + \text{CH}_4 \longrightarrow \text{ZrC} + 4\text{HBr}$	核燃料球涂层

13.3 物理气相沉积工艺及性能(表 13-7 ~ 表 13-14 和图 13-4 ~ 图 13-7)

表 13-7 各种溅射镀膜方法的原理、参数及示意图

序号	溅射方式	溅射电源	氩气压力 /Pa	特 征	原理图
1	二极溅射	DC 1 ~ 7kV 0.15 ~ 1.5mA/cm ² RF 0.3 ~ 10kW 1 ~ 10W/cm ²	~ 1.3	构造简单,在大面积的基板上可以制取均匀的薄膜,放电电流随压力和电压的变化而变化	 <p>阴极和阳极基片也有采用同轴圆柱结构的</p>
2	三极或四极溅射	DC 0 ~ 2kV RF 0 ~ 1kW	6×10^{-2} ~ 1×10^{-1}	可实现低气压,低电压溅射,放电电流和轰击靶的离子能量可独立调节控制。可自动控制靶的电流。也可进行射频溅射	
3	磁控溅射 (高速低温溅射)	0.2 ~ 1kV (高速低温) 3 ~ 30W/cm ²	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	在与靶表面平行的方向上施加磁场,利用电场和磁场相互垂直的磁控管原理减少了电子对基板的轰击(降低基板温度),使高速溅射成为可能	
4	对向靶溅射	DC RF	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	两个靶对向放置,在垂直于靶的表面方向加上磁场,可以对磁性材料进行高速低温溅射	
5	射频溅射 (RF 溅射)	RF 0.3 ~ 10kV 0 ~ 2kV	~ 1.3	开始是为了制取绝缘体如石英玻璃、Al ₂ O ₃ 的薄膜而研制的,也可溅射镀制金属膜	
6	偏压溅射	在基板上施加 0 ~ 500V 范围内的相对于阳极的正的或负的电位	~ 1.3	在镀膜过程中同时清除基板上轻质量的带电粒子,从而能降低基板中杂质气体(例如, H ₂ O、N ₂ 等残留气体等)的含量	
7	非对称交流溅射	AC 1 ~ 5kV 0.1 ~ 2mA/cm ²	~ 1.3	在振幅大的半周期内对靶进行溅射,在振幅小的半周期内对基板进行离子轰击,去除吸附的气体,从而获得高纯度的镀膜	

(续)


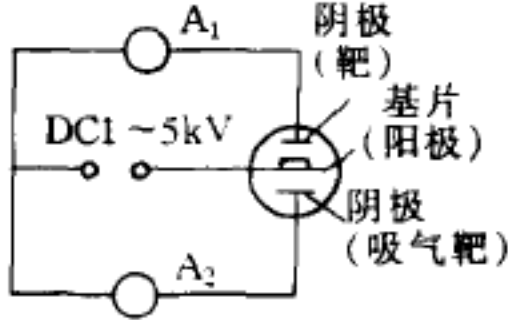
序号	溅射方式	溅射电源	氩气压力 /Pa	特 征	原理图
8	离子束溅射	DC	$\sim 10^{-3}$	在高真空下,利用离子束溅射镀膜,是非等离子体状态下的成膜过程。靶接地电位也可	
9	吸气溅射	DC1 ~ 7kV 0.15 ~ 1.5mA/cm ² RF0.3 ~ 10kW 1 ~ 10W/cm ²	~ 1.3	利用活性溅射粒子的吸气作用,除去杂质气体,能获得纯度高的薄膜	
10	反应溅射		在 Ar 中混入适量的活性气体,例如 N ₂ 、O ₂ 等分别制取 TiN、Al ₂ O ₃	制做阴极物质的化合物薄膜,例如,如果阴极(靶)是钛,可以制作 TiN、TiC	从原理上讲,上述各种方案都可以进行反应溅射,当然 1、9 两种方案一般不用于反应溅射

表 13-8 各种反应离子镀方法

种类	放电导入法	蒸发源	探极电压	基板电压	基板升温	特 点
离子镀(IP)	直接加于基板上	电子束或电阻加热	无	数百~数千伏 (-)	大	装置和工艺简单,放电电压和离子加速电压不能分别控制;易大型化
反应射频离子镀(R-RFIP)	高频电极	电子束或电阻加热	无	数百~数千伏 (-)	大	离化率高,需仔细调节工艺参数;难大型化
反应磁控溅射离子镀(R-MSIP)	复合等离子体	磁控溅射靶	数百伏(+)	数百~数千伏 (-)	大	离化率高,需仔细调节工艺参数,由于靶中毒,淀积速率低
活性反应蒸镀(ARE)	低能电子激发	电子束加热	数十~数百伏 (+)	接地或悬浮设置	小	离化率高,容易控制放电条件;易大型化;工艺参数难以按比例上调
反应离子镀(RIP或BARE)	低能电子激发	电子束加热	数十~数百伏 (+)	数百~数千伏 (-)	大	离化率高,放电电压和离子加速电压能分别控制
低压等离子体沉积(LPPD)	直接加于基板上	电子束加热	无	数十伏(DC或AC)	小	高反应率,附着力稍差,可大型化
强化活性反应离子镀	低能热电子增强激发	电子束或电阻加热	数百伏(+)	数百~数千伏 (-)	大	反应堆的蒸发与等离子体的产生和维持可独立控制;热阴极寿命短,对基板有加热效应

表 13-9 反应离子镀制备的镀层硬度

化合物	硬度 HV	工艺温度/℃	化合物	硬度 HV	工艺温度/℃
TiN	1900	500 ~ 550	CrC ₂	2000	500 ~ 550
TiC	2800	500 ~ 550	Mo ₂ C	2400	500 ~ 550
VC	1924	555	HfC	1730	515
NbC	1930	540	ZrC	1285	540
Cr ₂ N	1800	500 ~ 550	TaC	1285	590

表 13-10 蒸发速率对 TiC 镀层性能的影响

C ₂ H ₂ 的压力 /Pa	蒸发速率 /g·min ⁻¹	沉积速率 /μm·min ⁻¹	晶格常数 /×0.1nm	气体分子与金属 原子的数量比	显微硬度 HV(载荷 0.5N)
5.3×10 ⁻²	0.53	3	4.329±0.001	0.70~0.96	2754
5.3×10 ⁻²	0.67	4	4.317±0.002	0.62~0.63	2550
5.3×10 ⁻²	1.00	6	4.305±0.001	0.63~0.65	2070

表 13-11 反应气体压力对 TiC 镀层性能的影响

C ₂ H ₂ 的压力 /Pa	蒸发速率 /g·min ⁻¹	沉积速率 /μm·min ⁻¹	晶格常数 /×0.1nm	气体分子与金属 原子的数量比	显微硬度 HV(载荷 0.5N)
4×10 ⁻²	0.67	4	4.108±0.003	0.50~0.60	2000
5.3×10 ⁻²	0.67	4	4.137±0.002	0.62~0.64	2550
6.7×10 ⁻²	0.67	4	4.322±0.003	0.64~0.70	2775
1.0×10 ⁻¹	0.67	4	4.329±0.001	0.73~0.96	2670

表 13-12 不同工艺参数制备的 TiN 镀层

工艺参数	1	2	3
探极电流/A	1.1~1.3	0.15	1.5
电压/V	20	25~40	
镀膜室压力/×133Pa	5×10 ⁻⁴	4~9×10 ⁻⁴	8~9×10 ⁻⁴
工件温度/℃	260	500	500
反应时间/min	18	16	20
镀层厚度/μm	11	10	20
镀层颜色	金黄色	淡金黄色	淡金黄色
镀层结构	TiN	TiN+Ti ₂ N	TiN+Ti ₂ N
镀层硬度	2412	1750	1890

表 13-13 IBAD 合成某些硬度薄膜的工艺参数和性能

薄膜材料	轰击离子能量及束流	溅射离子能量及束流	靶	基片	工作气压 /Pa	沉积速率 /nm·s ⁻¹	膜厚	显微硬度 HV	显微结构
TiN	Ar ⁺ 或 N ₂ ⁺ , 100~500eV, 5~50μA/cm ²	Ar ⁺ , 1keV, 250~350μA/cm ²	Ti	NaCl	N ₂ , 3×10 ⁻²		0.1μm		多晶或 (100)取向
	N ₂ ⁺ , 40keV			Si, 9Cr18 钢	N ₂ , 6.5×10 ⁻⁴	0.3	2μm	15000~ 17000	多晶或 (111)取向

(续)

薄膜材料	轰击离子能量及束流	溅射离子能量及束流	靶	基片	工作气压 /Pa	沉积速率 /nm·s ⁻¹	膜厚	显微硬度 HV	显微结构
SiC	Ar ⁺ , 0 ~ 500eV, 10 ~ 40μA/cm ²	Ar ⁺ , 1keV, 250 ~ 1000 μA/cm ²	Si	Si, 铸铁	CH ₄ , 0.5 ~ 1.8 × 10 ⁻²	0.1 ~ 0.2	900nm	17000	非晶
BN	N ₂ ⁺ 2 ~ 20keV			高速钢	30% Ar + N ₂ , 8 × 10 ⁻³	0.1 ~ 0.3	1μm	50000	立方结构
Si ₃ N ₄	N ₂ ⁺ , 120μA/cm ²			316L 不锈钢, Al, Si	< 10 ⁻⁴	0.35 ~ 3.5	350nm	~ 12000	非晶
TiB ₂	Ar ⁺ , 320keV; Xe ⁺ , 320keV	Ar ⁺ , 1.2keV, 370μA/cm ²	TiB ₂	高速钢	5 × 10 ⁻³	0.06	1μm		六方晶体结构
DLC	CH _n ⁺ , 0.2 ~ 25keV 5 ~ 10mA	Ar ⁺ , 3.5keV, 130 ~ 150mA	C	Si, AISI S2100 钢	CH ₄ , 1.3 × 10 ⁻²	0.1	600	51000	sp ² + sp ³

表 13-14 45 钢沉积 TiN 膜的典型工艺参数

蒸发源材料	源-基片距离 /mm	源电压 /V	源电流 /A	工件偏压 /V	工件离子流 /A	淀积速率 /nm·s ⁻¹	显微硬度 HV
高纯 Ti	190	20	120 ~ 150	- 200 ~ - 500	1.2 ~ 1.3	9.1 ~ 9.2	3540

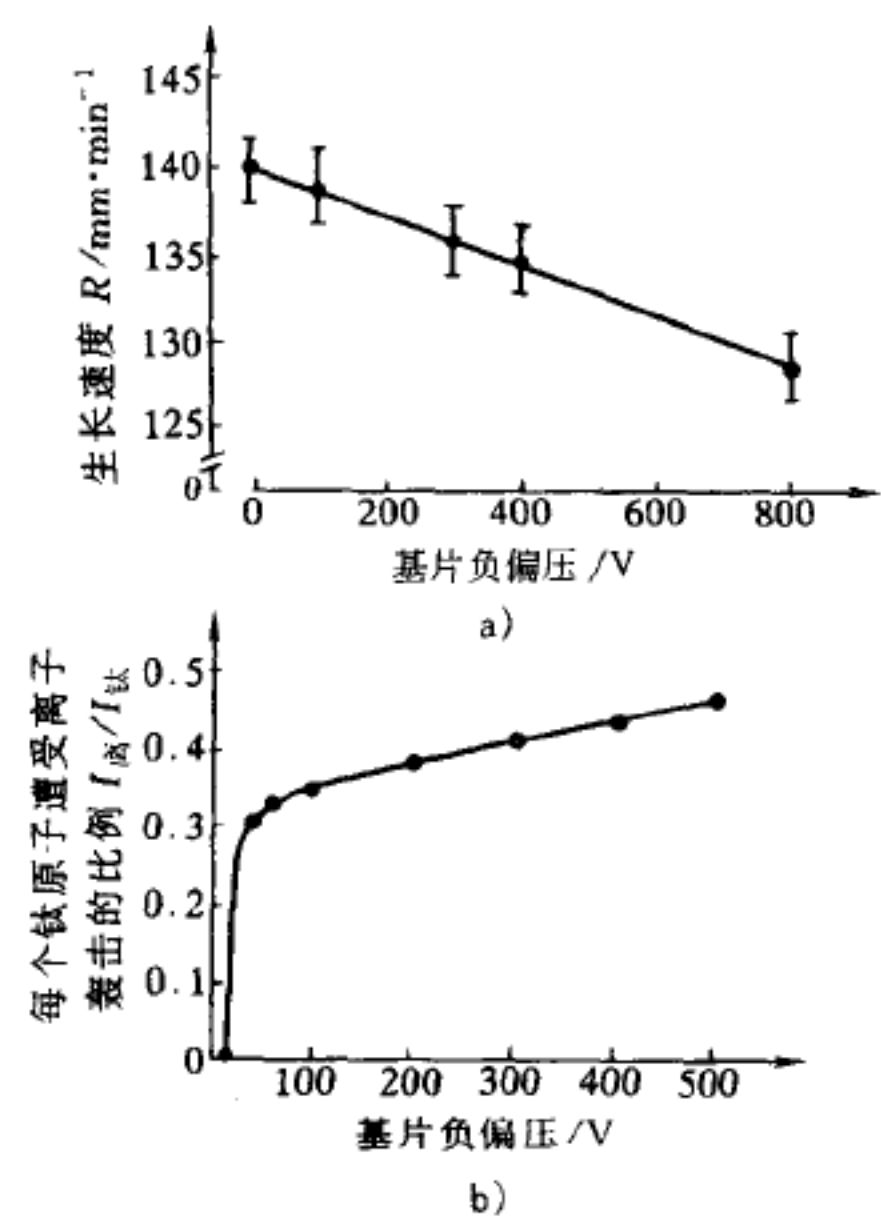


图 13-4 在 300℃ 不同基片偏压沉积 TiN 的结果
a) 生长速率和偏压的关系 b) 每个钛原子遭受离子轰击的比例与偏压的关系

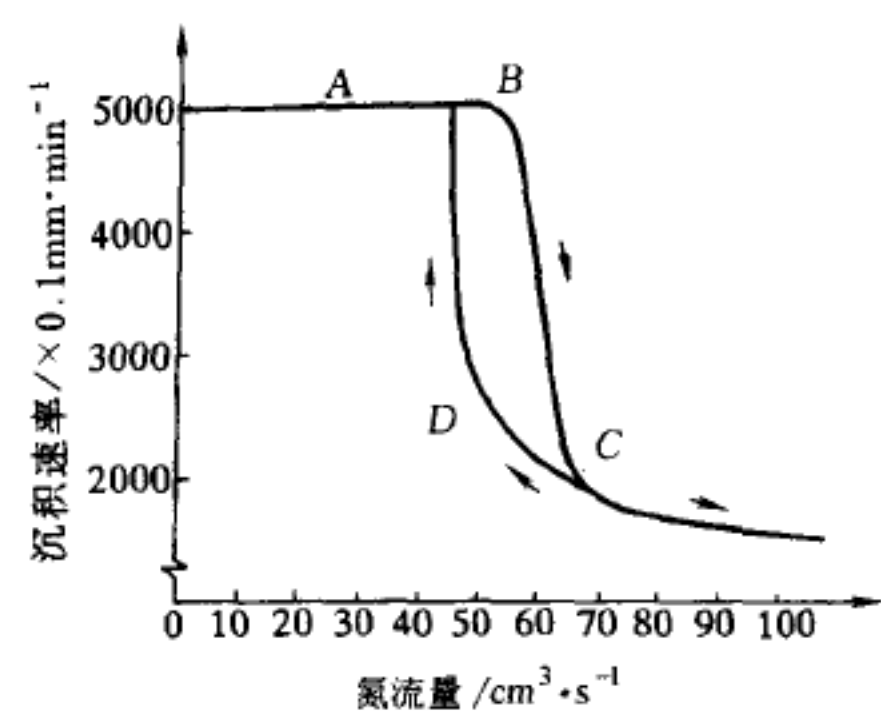


图 13-5 沉积 TiN 时沉积速率和流量变化的滞后现象
靶功率 10kW, Ar-N₂ 混合放电

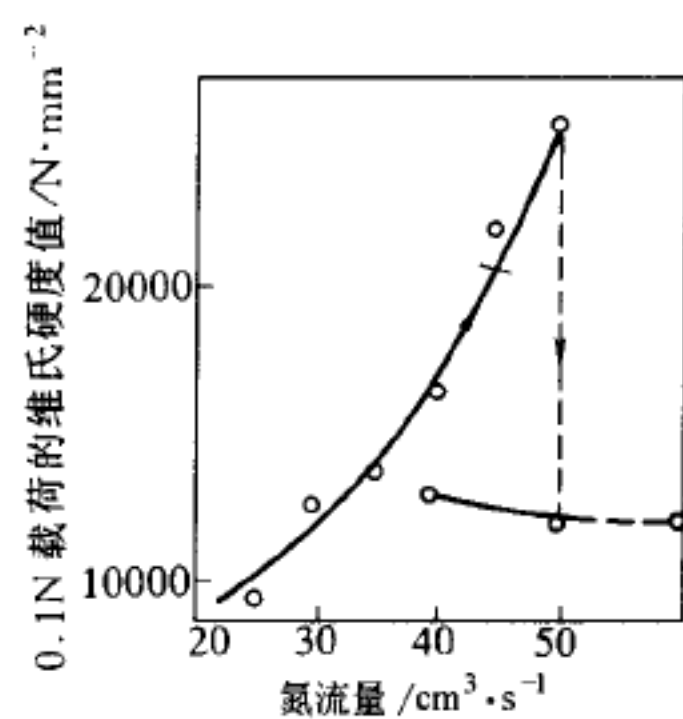


图 13-6 氮流量与 TiN_x 显微硬度值的关系

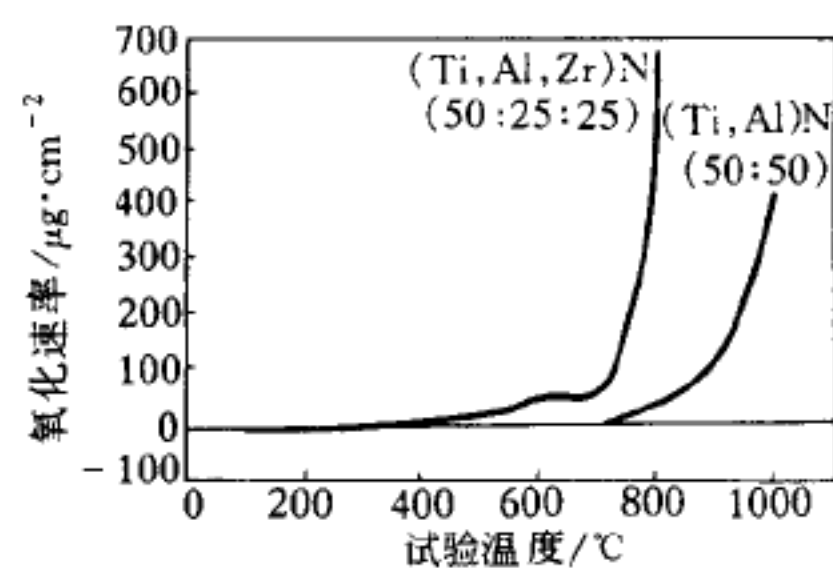


图 13-7 在不锈钢上镀 $(\text{Ti, Al, Zr})\text{N}$ 和 $(\text{Ti, Al})\text{N}$ 膜的氧化速率与温度的关系(1h 后)

第 14 章 可控气氛

14.1 金属在加热过程中气体的反应

1. 各种化学反应及平衡常数(表 14-1 ~ 表 14-3)

表 14-1 钢铁与炉气间的化学反应

类别	气 氛	化学反应
氧化还原反应	含 O ₂ 气氛	$3\text{Fe} + 2\text{O}_2 = \text{Fe}_3\text{O}_4$ $< 570^\circ\text{C}$ $4\text{Fe} + 3\text{O}_2 = 2\text{Fe}_2\text{O}_3$ $> 570^\circ\text{C}$ 还有 $2\text{Fe} + \text{O}_2 = 2\text{FeO}$
	CO ₂ -CO	$< 570^\circ\text{C}$ $3\text{Fe} + 4\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{CO}$ $> 570^\circ\text{C}$ $\text{Fe} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{FeO} + \text{CO}$ $3\text{FeO} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}$
	H ₂ O-H ₂	$< 570^\circ\text{C}$ $3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2$ $> 570^\circ\text{C}$ $\text{Fe} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{FeO} + \text{H}_2$ $3\text{FeO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2$
脱碳-增碳反应	含 O ₂ 气氛	$\text{C}(\gamma\text{-Fe}) + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ $\text{Fe}_3\text{C} + \text{O}_2 = 3\text{Fe} + \text{CO}_2$
	CO-CO ₂	$\text{C}(\gamma\text{-Fe}) + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}$ $\text{Fe}_3\text{C} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 3\text{Fe} + 2\text{CO}$
	CO-H ₂ -H ₂ O	$\text{C}(\gamma\text{-Fe}) + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2$ $\text{Fe}_3\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 3\text{Fe} + \text{CO} + \text{H}_2$
	H ₂ -CH ₄	$\text{C}(\gamma\text{-Fe}) + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4$ $\text{Fe}_3\text{C} + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons 3\text{Fe} + \text{CH}_4$

表 14-2 主要化学反应与平衡常数

序号	反应式	平衡常数	序号	反应式	平衡常数
1	$\text{Fe} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{FeO} + \text{H}_2$	$K_1 = \frac{p_{\text{H}_2}}{p_{\text{H}_2\text{O}}}$	5	$\text{CH}_4 \rightleftharpoons \text{C} + 2\text{H}_2$	$K_5 = \frac{p_{\text{H}_2}^2}{p_{\text{CH}_4}}$
2	$\text{Fe} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{FeO} + \text{CO}$	$K_2 = \frac{p_{\text{CO}}}{p_{\text{CO}_2}}$	6	$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{CO}$	$K_6 = \frac{p_{\text{H}_2} \times p_{\text{CO}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}}$
3	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$	$K_3 = \frac{p_{\text{H}_2} \times p_{\text{CO}_2}}{p_{\text{H}_2\text{O}} \times p_{\text{CO}}}$	7	$\text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4 \rightleftharpoons \text{CO} + 3\text{H}_2$	$K_7 = \frac{p_{\text{CO}} \times p_{\text{H}_2}^3}{p_{\text{H}_2\text{O}} \times p_{\text{CH}_4}}$
4	$\text{C} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}$	$K_4 = \frac{p_{\text{CO}}^2}{p_{\text{CO}_2}}$	8	$\text{CO}_2 + \text{CH}_4 \rightleftharpoons 2\text{CO} + 2\text{H}_2$	$K_8 = \frac{p_{\text{CO}}^2 \times p_{\text{H}_2}^2}{p_{\text{CO}_2} \times p_{\text{CH}_4}}$

表 14-3 不同温度下的反应平衡常数

温度/°C	$K_1 = \frac{p_{H_2}}{p_{H_2O}}$	$K_2 = \frac{p_{CO}}{p_{CO_2}}$	$K_3 = \frac{p_{H_2} \times p_{CO_2}}{p_{H_2O} \times p_{CO}}$	$K_4 = \frac{p_{CO}^2}{p_{CO_2}}$	$K_5 = \frac{p_{H_2}^2}{p_{CH_4}}$	$K_6 = \frac{p_{H_2} \times p_{CO}}{p_{H_2O}}$	$K_7 = \frac{p_{CO} \times p_{H_2}^3}{p_{H_2O} \times p_{CH_4}}$	$K_8 = \frac{p_{CO}^2 \times p_{H_2}^2}{p_{CO_2} \times p_{CH_4}}$
400	9.12 ^①	0.74 ^①	12.3	9×10^{-5}	0.0566	0.0011	6.23×10^{-5}	5.05×10^{-7}
450	6.38 ^①	0.86 ^①	7.38	7.3×10^{-4}	0.164	0.0054	0.00089	1.19×10^{-4}
500	4.68 ^①	0.96 ^①	4.88	4.7×10^{-3}	0.422	0.023	0.0097	1.98×10^{-3}
550	3.53 ^①	1.03	3.45	0.023	0.977	0.079	0.077	0.022
600	2.99	1.17	2.55	0.096	2.09	0.245	0.512	0.201
650	2.65	1.35	1.96	0.343	3.92	0.672	2.63	1.34
700	2.38	1.53	1.56	1.06	7.16	1.65	11.8	7.59
750	2.17	1.72	1.27	2.96	12.3	3.76	46.2	36.4
800	2.00	1.90	1.05	7.48	20.1	7.85	157.8	152
850	1.84	2.07	0.891	17.46	31.8	15.5	492.9	558
900	1.72	2.24	0.765	37.76	48.3	28.8	1391	1820
950	1.61	2.41	0.668	76.7	71.0	51.2	3635	5430
1000	1.51	2.57	0.589	146.5	102.4	86.3	8837	14000
1050	1.44	2.72	0.527	264.0	141.2	139.1	19600	37200
1100	1.37	2.88	0.474	463.4	192	219.2	42100	89000
1150	1.31	3.03	0.433	767.4	256	332.3	35100	1.96×10^5
1200	1.26	3.21	0.395	1244	335	491.4	1.65×10^5	4.17×10^5
1250	1.22	3.36	0.363	1945	431.5	706	3.85×10^5	8.4×10^5
1300	1.18	3.49	0.339	2951	547	1000	5.47×10^5	1.62×10^6

① 在 570°C 温度以下的稳定氧化物是 Fe_3O_4 ，而不是 FeO 。

2. 平衡曲线(图 14-1 ~ 图 14-19)

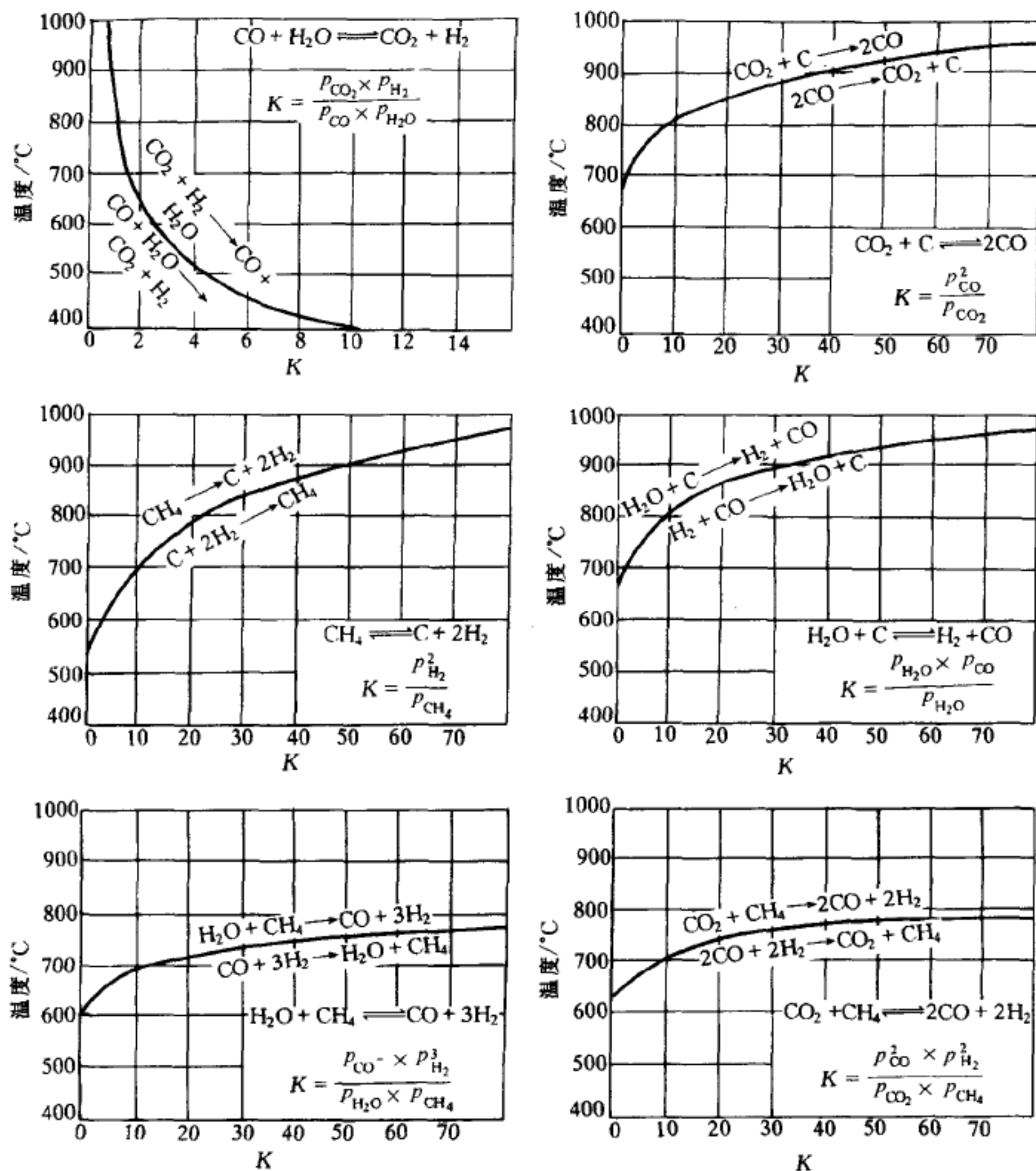
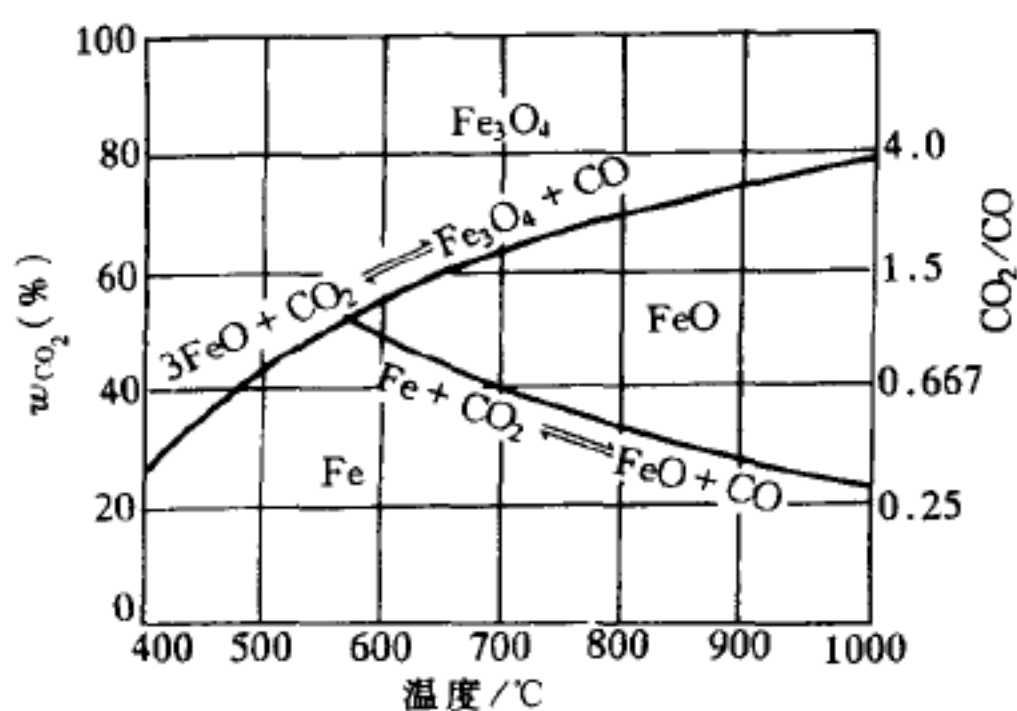
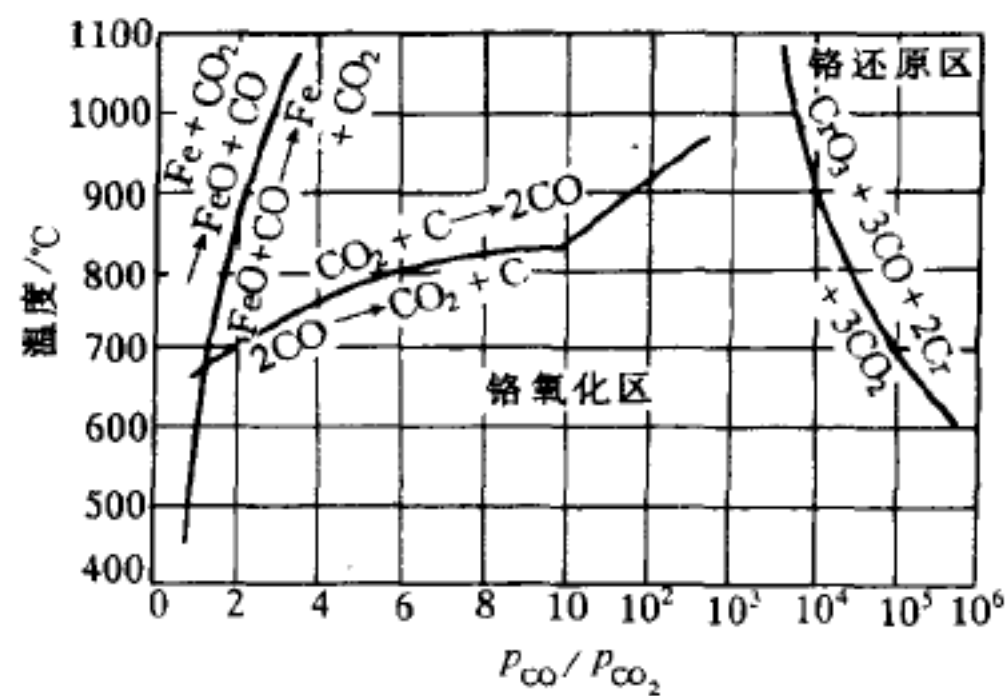
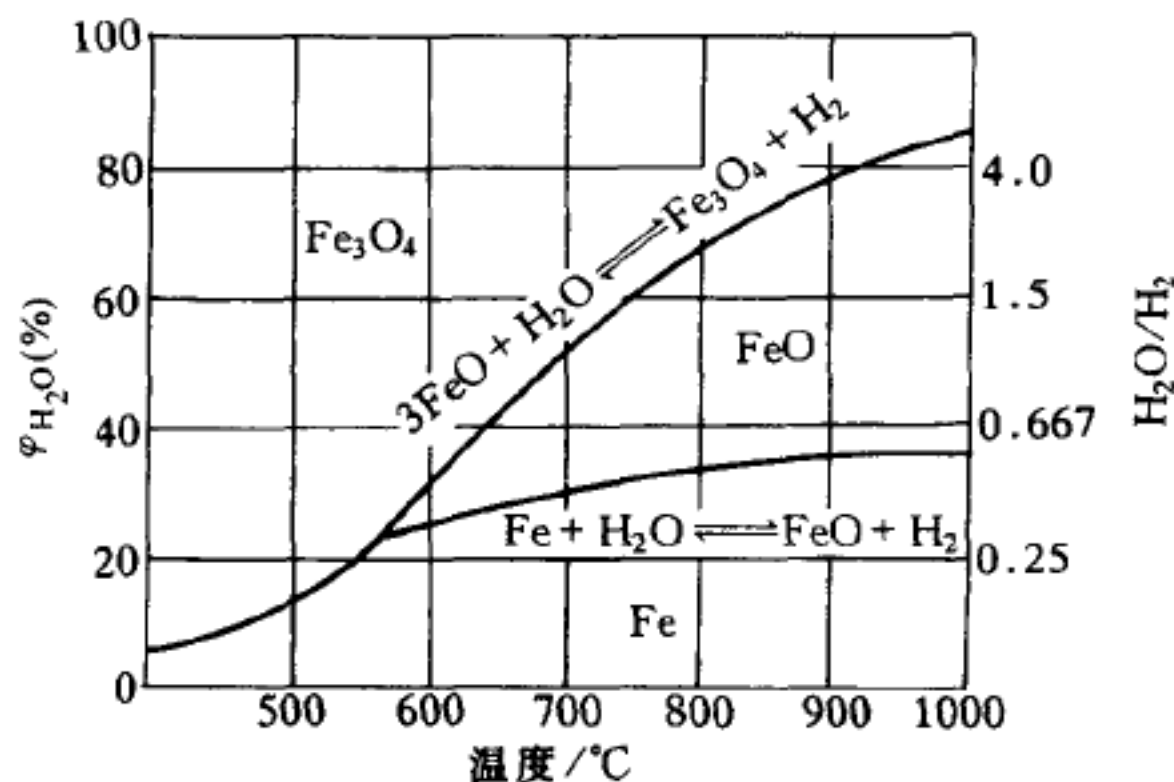
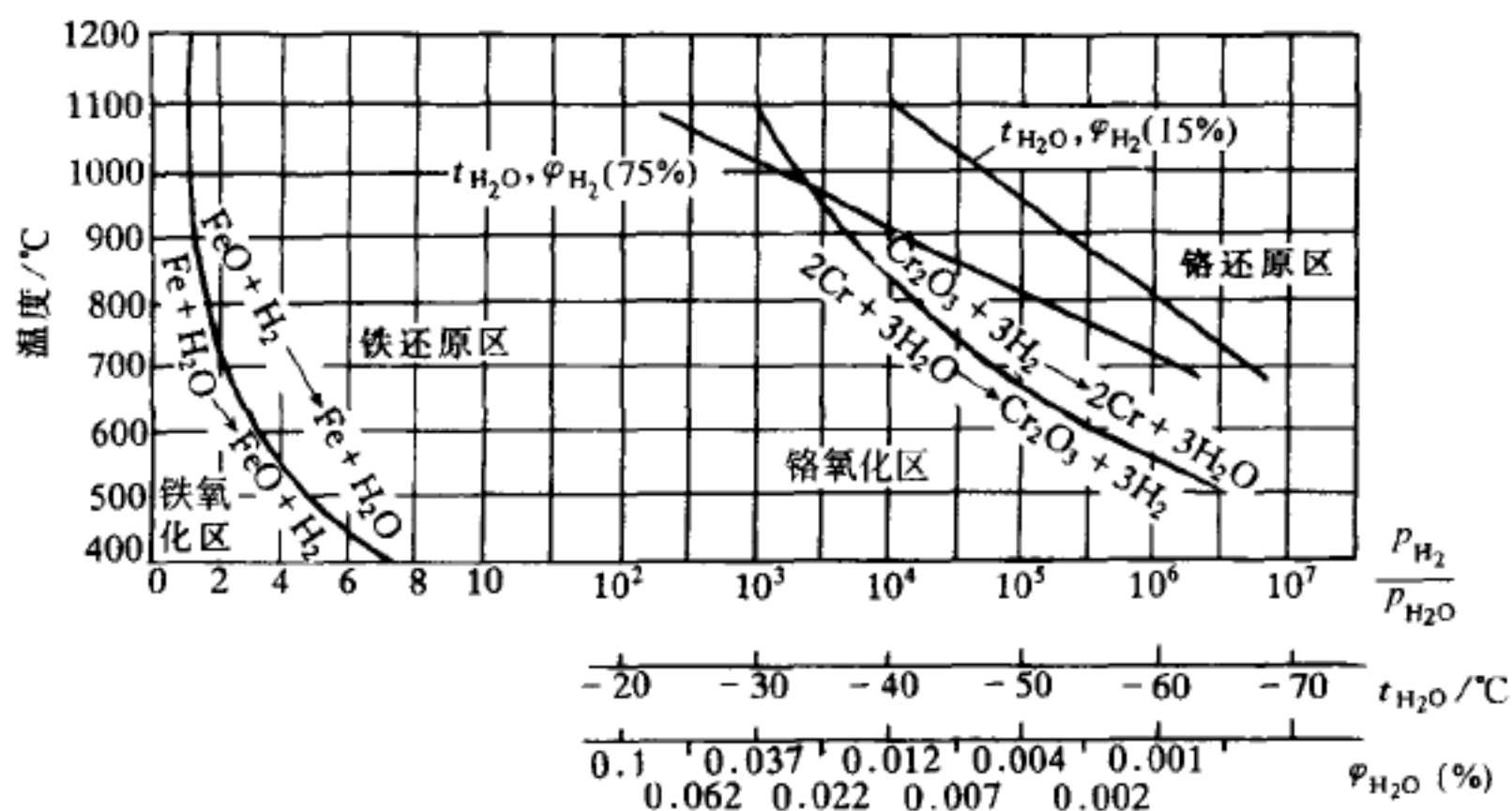
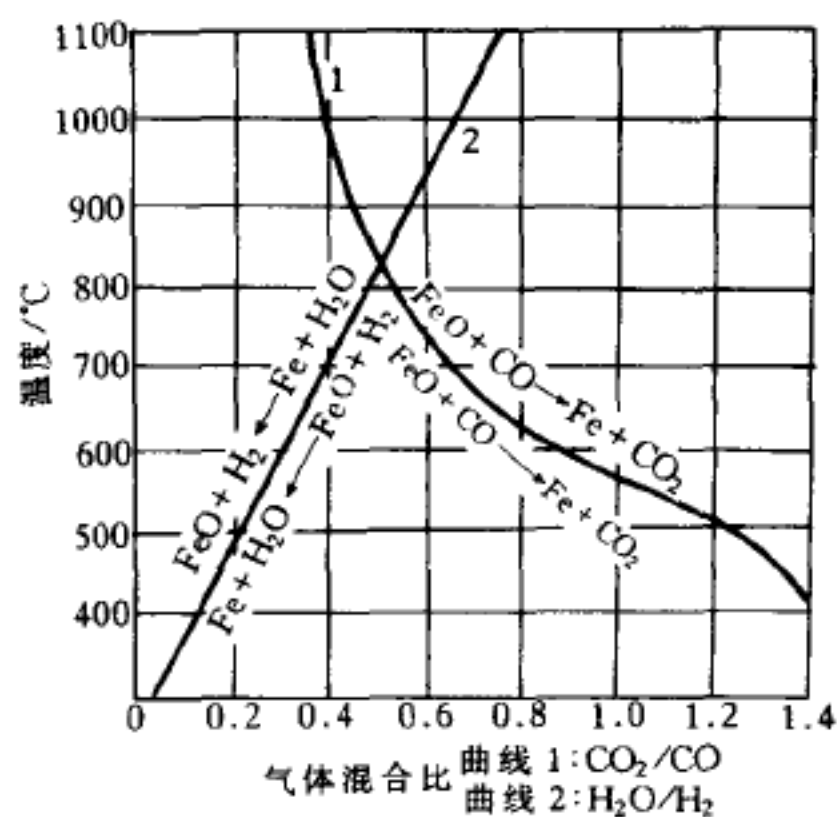
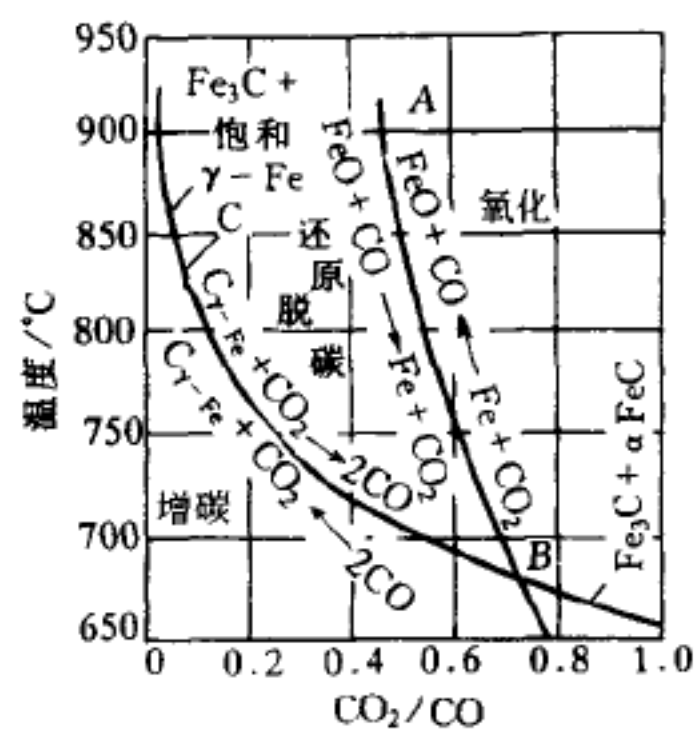


图 14-1 一些气体反应的平衡曲线

图 14-2 铁在 CO_2 — CO 气氛中氧化反应平衡曲线图 14-3 CO — CO_2 气氛和铁铬的平衡曲线

图 14-4 铁在 H_2 — H_2O 气氛中氧化反应平衡曲线图 14-5 H_2 — H_2O — N_2 气氛和铁铬的平衡曲线 $t_{\text{H}_2\text{O}}$ —气氛露点图 14-6 Fe 与 FeO 在 CO — CO_2 ,
 H_2 — H_2O 气氛中平衡关系图 14-7 反应 $\text{Fe}_7[\text{C}] + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{Fe} + 2\text{CO}$ 的平衡曲线

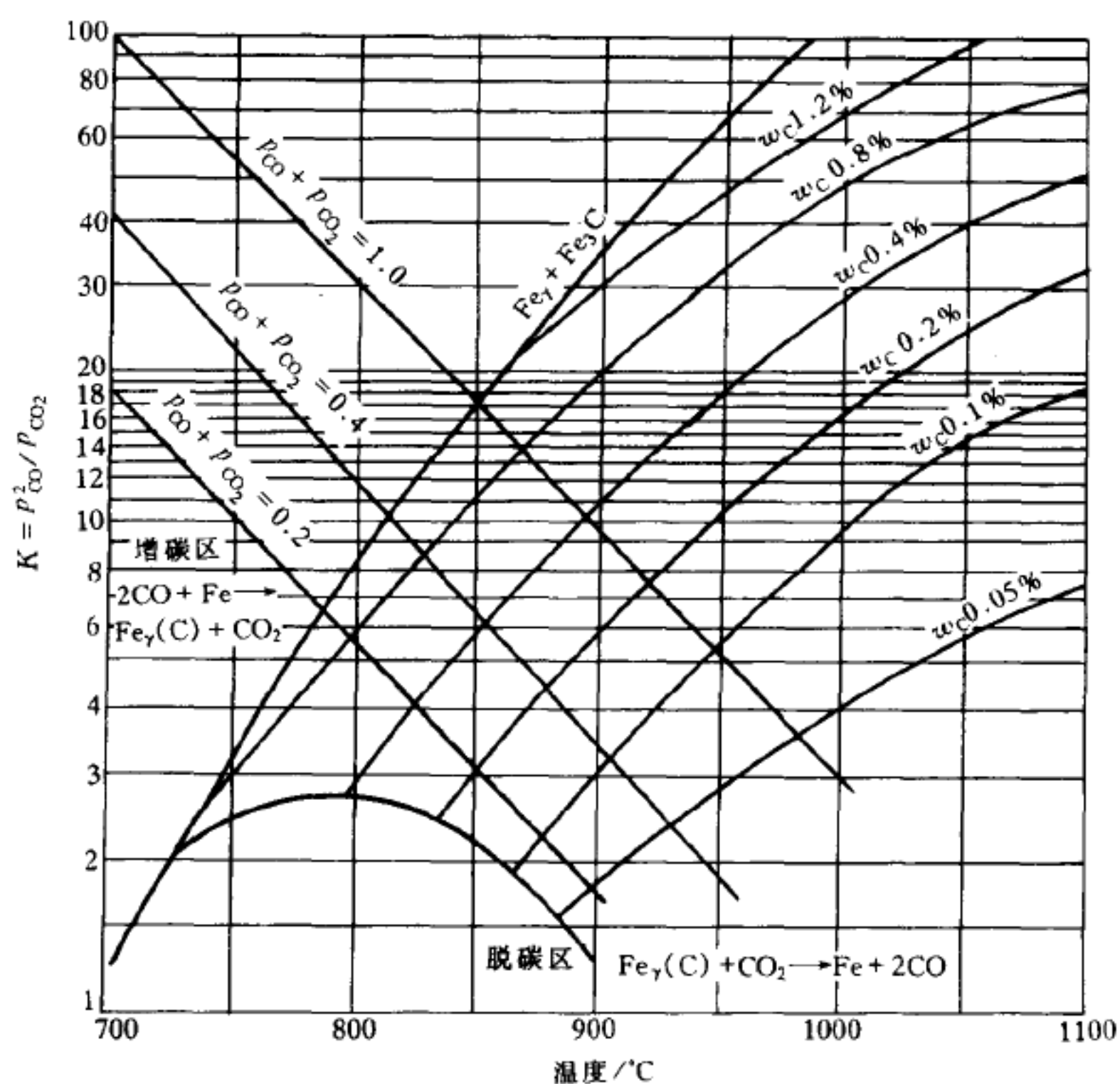


图 14-8 反应 $\text{Fe}_{\gamma}[\text{C}] + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{Fe} + 2\text{CO}$ 的平衡常数与温度及钢中碳含量的关系

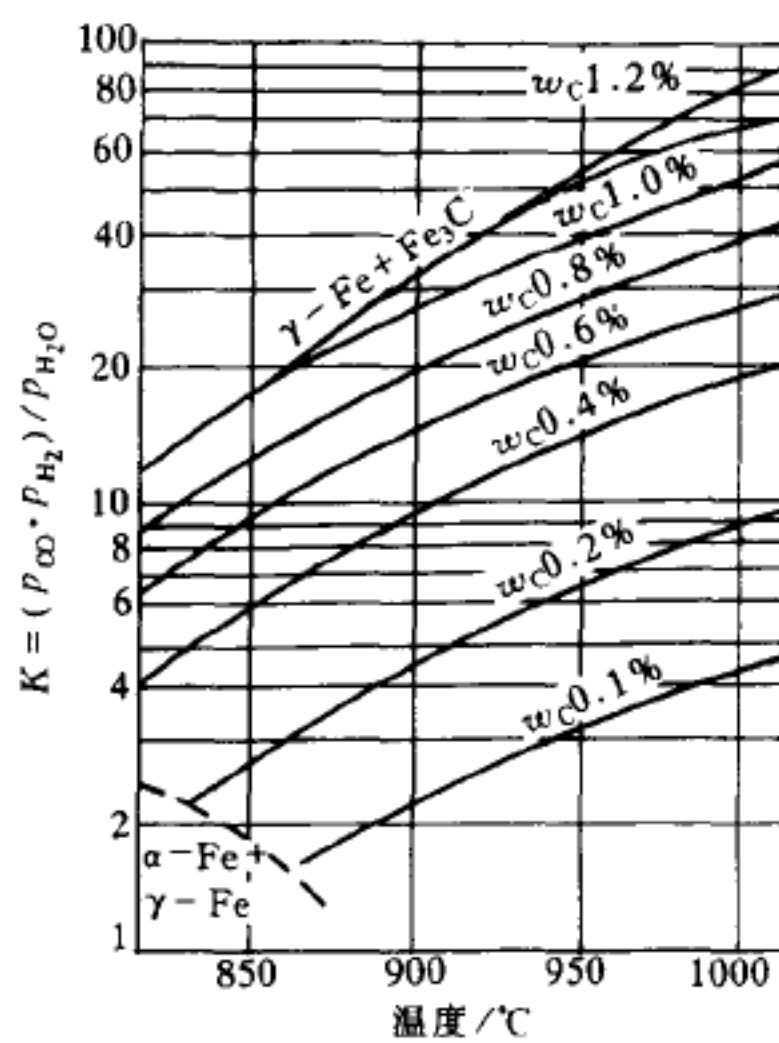
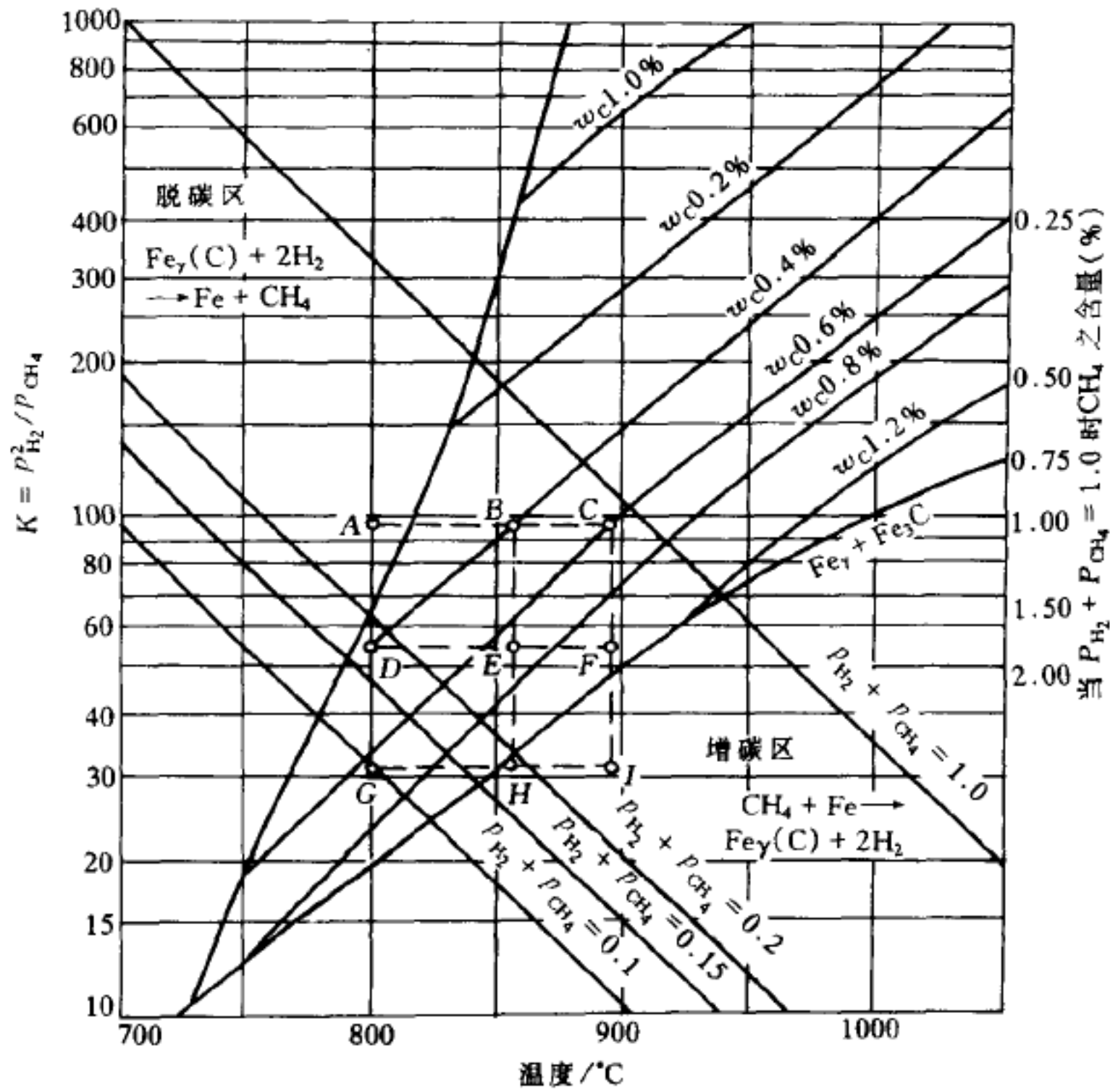
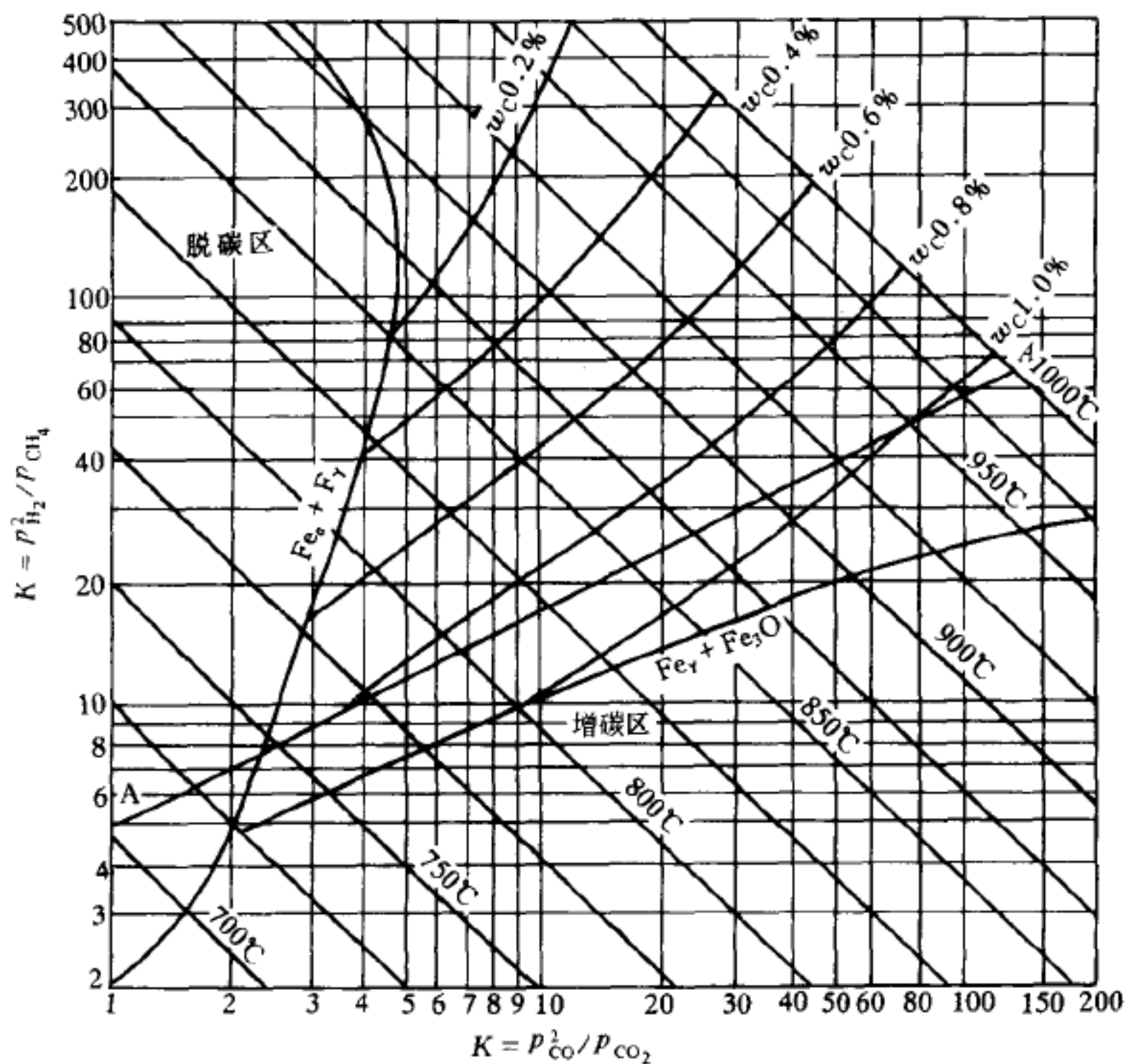


图 14-9 反应 $\text{C}_{(\gamma\text{-Fe})} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2$ 的平衡曲线


 图 14-10 反应 $Fe_3C + 2H_2 \rightleftharpoons 3Fe + CH_4$ 的平衡常数与温度及钢中碳含量的关系

 图 14-11 钢与 $CO-CO_2-H_2-CH_4$ 气氛之平衡关系(低于 AA 线时, CH_4 、 CO 分解, 生成炭黑)

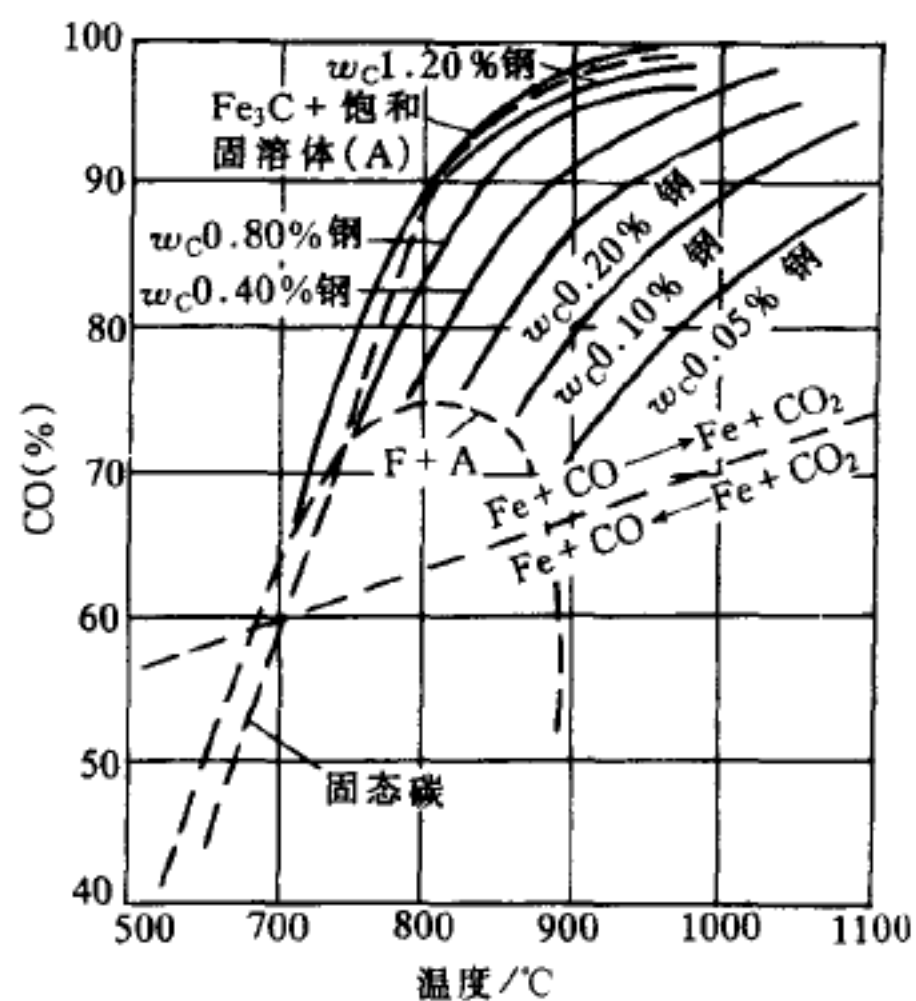


图 14-12 CO—CO₂ 气氛和钢的不同碳含量的平衡曲线 ($p_{CO} + p_{CO_2} = 0.101\text{MPa}$)

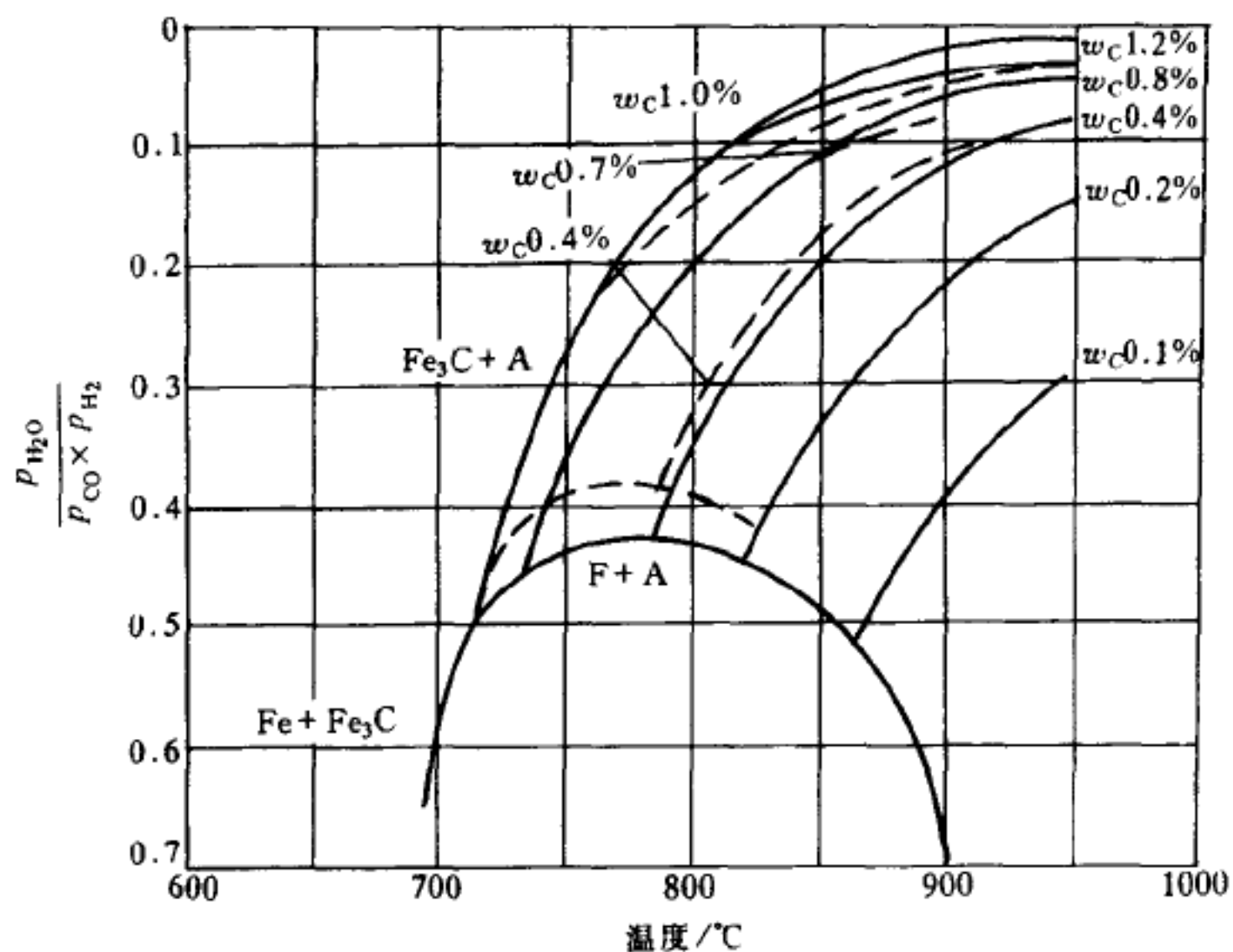


图 14-13 钢在 H₂—H₂O—CO 气氛中加热时的相图
(实线为计算数据, 虚线为实测数据)

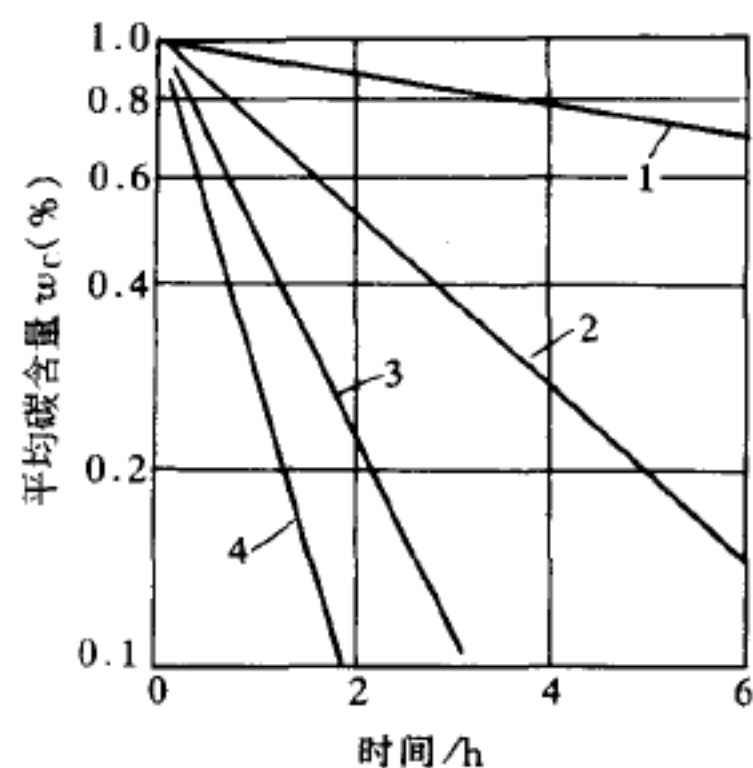


图 14-14 钢在 H_2 中加热的脱碳与 H_2 中含水蒸气量的关系(钢片厚 1mm, 在 $1000^\circ C$ 加热)

1—干燥 H_2 2—含水蒸气 133.322Pa 3—含水蒸气 666.61Pa 4—含水蒸气 2666.44Pa

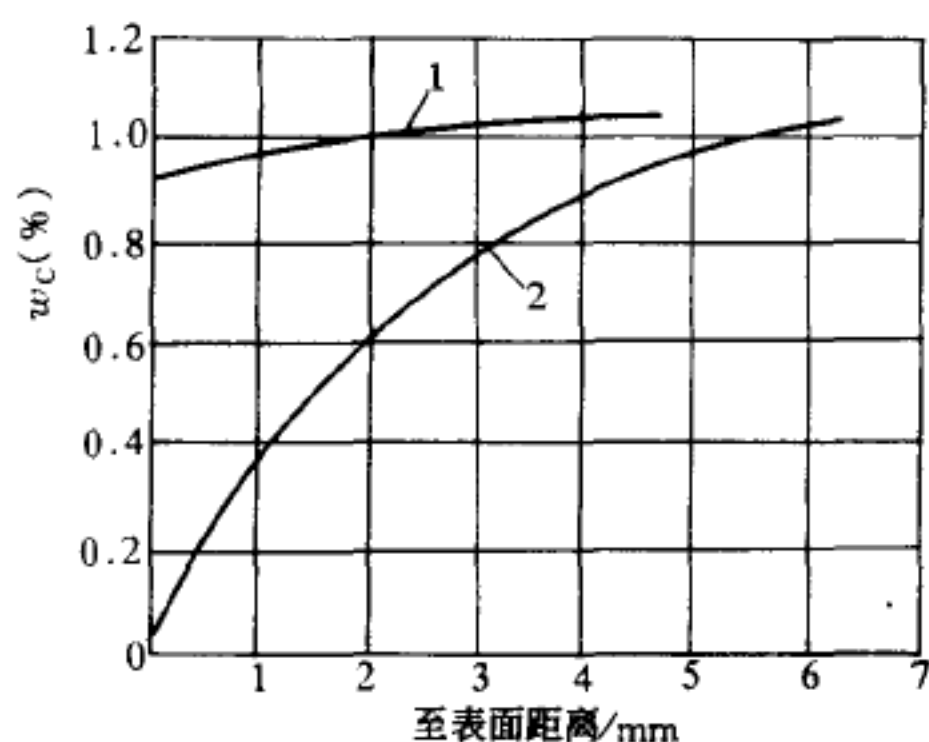


图 14-16 含 $w_c 1.08\%$ 的钢在不同含水蒸气量的 H_2 中于 $1000^\circ C$ 加热 20h 的脱碳

1—干燥氢 2—在 $18^\circ C$ 饱和水蒸气的 H_2 ($16.4g/m^3$)

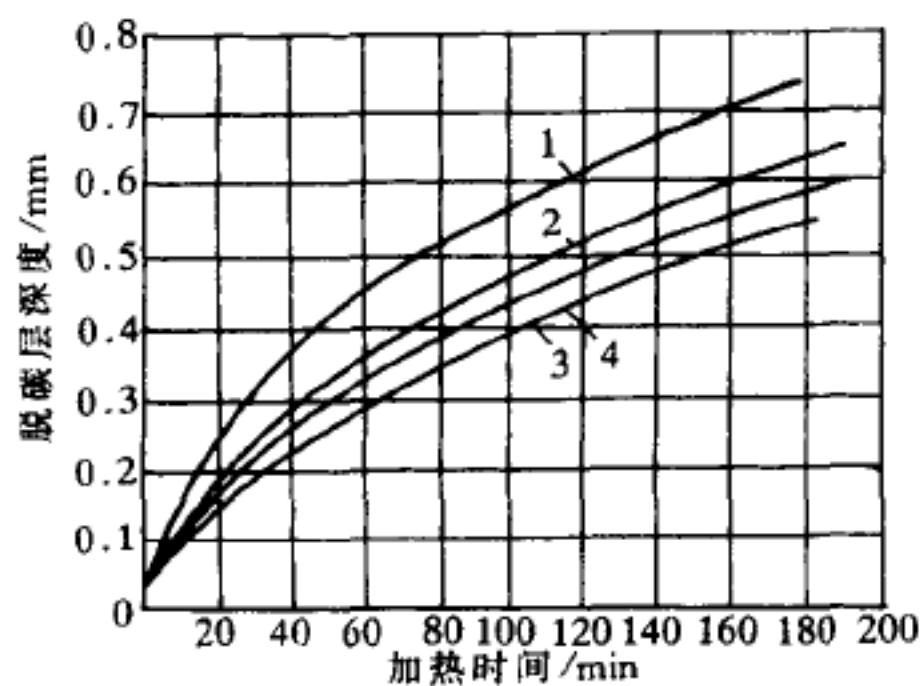


图 14-18 40 钢脱碳层厚度和加热时间的关系(加热温度 $850^\circ C$, 炉气 φ_{H_2} 8% ~ 12%, 其余 N_2)

1— $H_2O/H_2 = 0.065$ 2— $H_2O/H_2 = 0.045$
3— $H_2O/H_2 = 0.033$ 4— $H_2O/H_2 = 0.025$

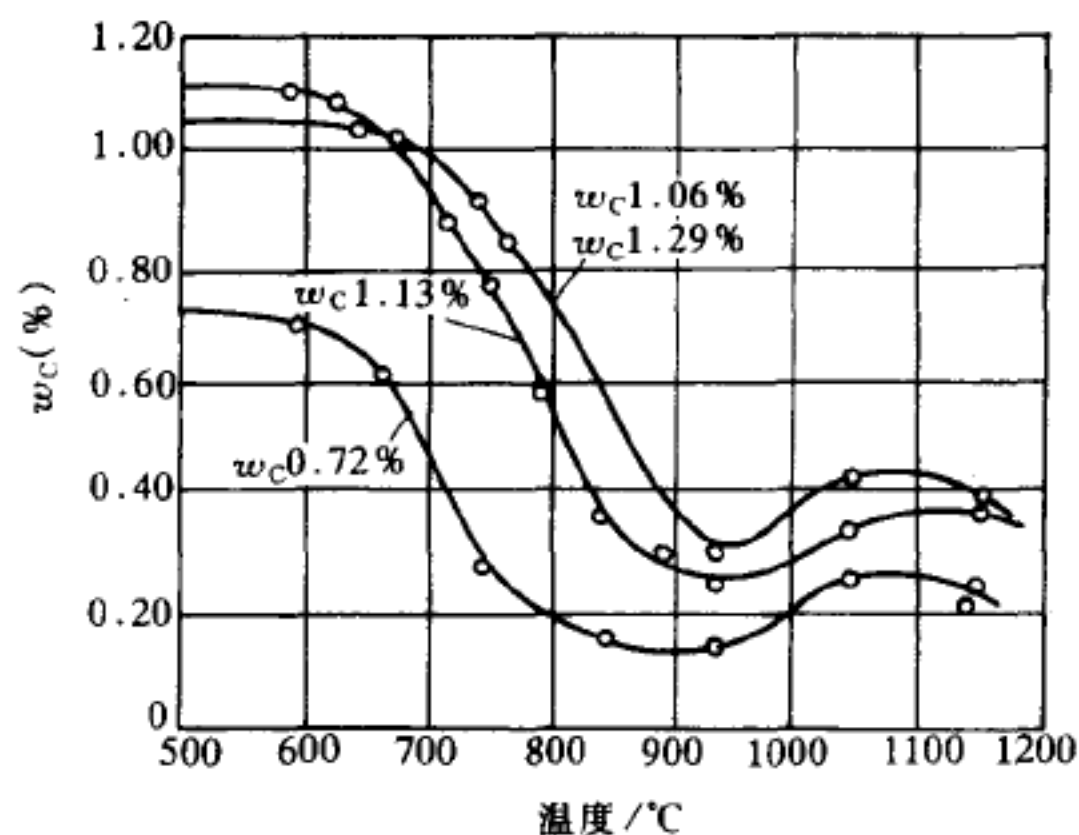


图 14-15 钢在 H_2 中加热 16h 的脱碳

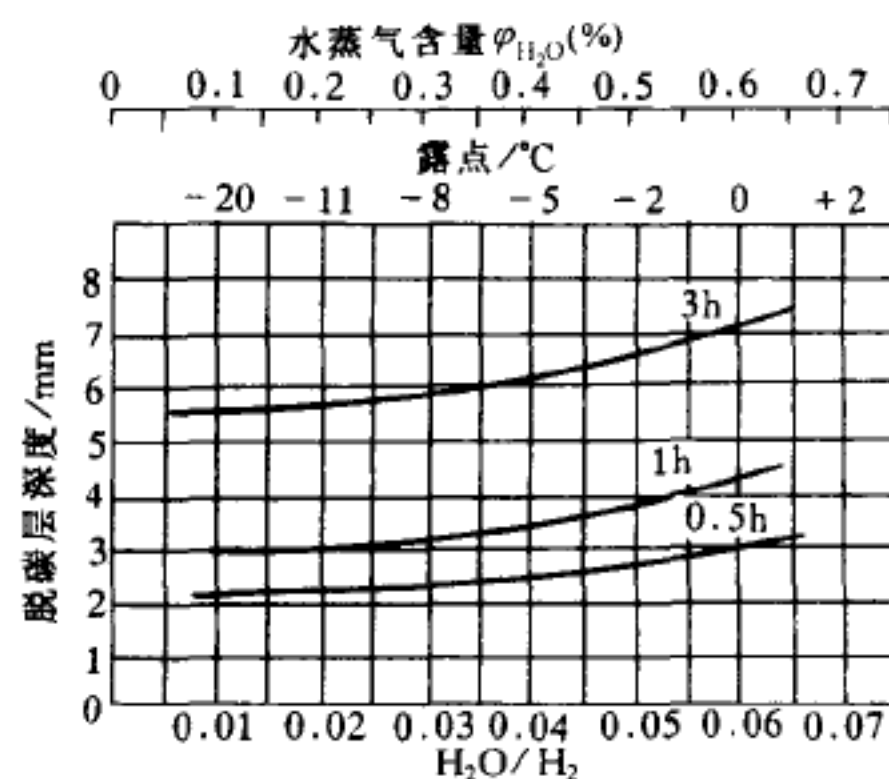


图 14-17 40 钢在 $850^\circ C$ 的脱碳层深度和 H_2 — H_2O — N_2 气氛露点的关系

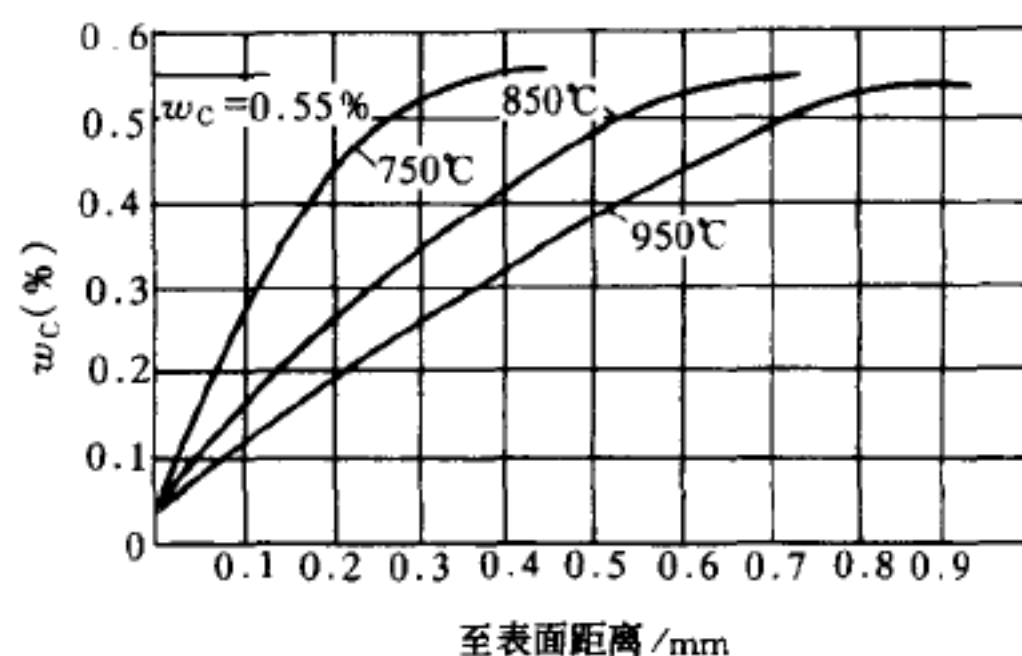


图 14-19 50 钢在 $H_2-N_2-H_2O$ 气氛中于不同温度下的脱碳($H_2O/H_2 = 0.037 \sim 0.040$, 加热时间 3h)

14.2 可控气氛的类型、制备方法和应用范围

1. 可控气氛分类代号及应用(图 14-20 和表 14-4 ~ 表 14-7)

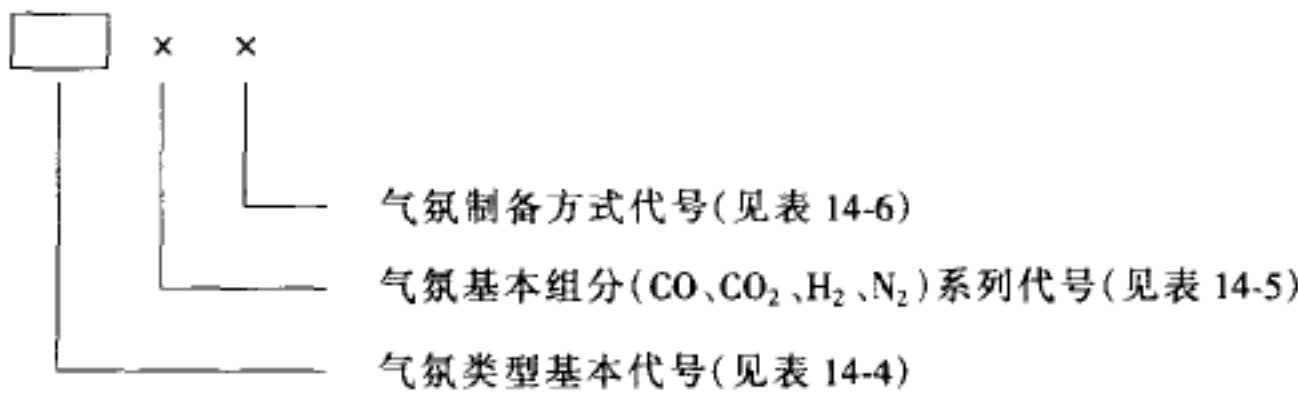


图 14-20 可控气氛分类代号表示方法

表 14-4 气氛类型基本代号

气氛名称		基本代号	
放热式气氛	普通放热式气氛	FQ	PFQ
	净化放热式气氛		JFQ
吸热式气氛		XQ	
放热—吸热式气氛		FXQ	
有机液体裂解气氛		YLQ	
氮基气氛		DQ	
氮制备气氛	氮分解气氛	AQ	FAQ
	氮燃烧气氛		RAQ
木炭制备气氛		MQ	
氢气		QQ	

表 14-5 气氛基本组分系列代号

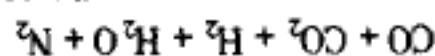
气氛基本组分	代 号
CO—CO ₂ —H ₂ —N ₂	1
CO—H ₂ —N ₂	2
CO—H ₂	3
CO—N ₂	4
H ₂ —N ₂	5
H ₂	6
N ₂	7

表 14-6 气氛制备方式代号

制备方式	代 号
炉外制备	0
炉内直接生成	1

表 14-7 各处可控气氛和保护气氛的分类及用途

类别	名称	反应类型	化学反应或制备原理	参考成分 $\varphi(\%)$										各种分类法					安全性	用途
				CO ₂	O ₂	CO	H ₂	CH ₄	H ₂ O	N ₂	Ar	He	中国	美 Surface Combustion Co.	美煤气协会(A. G. A.)	Hotchkiss 和 Webber	俄罗斯			
	用天然气的放热式制氮	放热式	贫气: CH ₄ + 9.52 空气 → CO ₂ + 2H ₂ O + 7.42N ₂ (完全燃烧) 富气: CH ₄ + 2.38 空气 → CO + 2H ₂ + 1.88N ₂ ; H ₂ + 0.5O ₂ → H ₂ O	11.5	0.0	0.7	0.7	0.0	饱和	其余 (87.1)	—	—	PFQ10	DX lean	101	G2b	ΠC—09	不可燃,有毒	铜光亮退火,粉末冶金烧结	
				5.0	0.0	10.0	15.0	1.0	饱和	其余 (87.1)	—	—		DX rich	102	G1a	ΠC—06	可燃,有毒	低碳钢的光亮退火,正火,回火,粉末冶金烧结	
	用丙烷制热的放热式制氮	放热式	贫气: C ₃ H ₈ + 23.8 空气 → 3CO ₂ + 4H ₂ O + 18.8N ₂ (完全燃烧) 富气: C ₃ H ₈ + 7.14 空气 → 3CO + 4H ₂ O + 5.64N ₂ ; CO + 0.5O ₂ → CO ₂ ; H ₂ + 0.5O ₂ → H ₂ O	12.5	0.0	1.5	0.8	0.0	0.8	其余 (84.4)	—	—	PFQ10	DX lean	101	G2b	ΠC—09	不可燃,有毒	铜光亮退火,粉末冶金烧结	
				7.0	0.0	10.2	8.2	0.5	0.8	其余 (73.3)	—	—		DX rich	102	G1a	ΠC—06	可燃,有毒	低碳钢的光亮退火,正火,回火,粉末冶金烧结	
	用丁烷制热的放热式制氮	放热式	贫气: C ₄ H ₁₀ + 30.95 空气 → 4CO ₂ + 5H ₂ O + 24.47N ₂ (完全燃烧) 富气: C ₄ H ₁₀ + 9.52 空气 → 4CO + 5H ₂ + 7.52N ₂ ; CO + 0.5O ₂ → CO ₂ ; H ₂ + 0.5O ₂ → H ₂ O	12.8	0.0	1.5	0.8	0.0	0.8	其余 (84.1)	—	—	PFQ10	DX lean	101	G2b	ΠC—09	不可燃,有毒	铜光亮退火,粉末冶金烧结	
				7.3	0.0	10.2	7.6	0.5	0.8	其余 (73.6)	—	—		DX rich	102	G1a	ΠC—06	可燃,有毒	低碳钢的光亮退火,正火,回火,粉末冶金烧结	
	用甲烷制热的富气、除去CO ₂ 、H ₂ O	放热式	反应同用天然气制备的放热式富气,用硅胶、冷冻、乙醇胺、分子筛等吸收CO ₂ 、H ₂ O	微量	0.0	10.5	15.5	1.0	露点 -40℃	73.0	—	—	JFQ20	NX rich	202	G2a	ΠCO—06	可燃,有毒	铜光亮退火,中碳、低碳钢,光亮退火,中碳、高碳钢,光亮淬火	



(续)

类别	名称	反应类型	化学反应或制备原理	参考成分 $\varphi(\%)$								各种分类法					安全性	用途
				CO ₂	O ₂	CO	H ₂	CH ₄	H ₂ O	N ₂	Ar	He	中国	美 Surface Combustion Co.	美煤气协会(A. G. A.)	Hotchkiss 和 Webber	俄罗斯	
$\text{Zn} + \text{O}_2 \rightarrow \text{ZnO} + \text{CO} + \text{CO}_2$	木炭燃烧式氮	放热式	$\text{C} + 2.38 \text{ 空气} \rightarrow \text{CO} + 1.88 \text{N}_2$ $\text{CO} + 0.5 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	1.0 ~ 2.0	0.0	30 ~ 32	1.5 ~ 7.0	0 ~ 0.5	露点 -30℃	其余	—	—	MQ10	—	402	—	IT	可燃, 有毒 可锻铸铁 退火, 渗碳
	用天然气的吸热式氮	吸热式	$\text{CH}_4 + 2.38 \text{ 空气} \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2 + 1.88 \text{N}_2$, 用 Ni 催化剂, 反应温度 $\geq 1000^\circ\text{C}$	微量	0.6	20.7	38.7	0.8	露点 -4 ~ -20℃	39.8	—	—	XQ20	RX	302	H	KT—BO	渗碳, 复氮共渗, 复氮, 光亮淬火, 钎焊, 高速钢淬火
	用丙烷、丁烷制备的吸热式氮	吸热式	$\text{C}_3\text{H}_8 + 7.14 \text{ 空气} \rightarrow 3\text{CO} + 1.88 \text{N}_2$, 用 Ni 催化剂, 反应温度 $\geq 1000^\circ\text{C}$	微量	0.0	23 ~ 25	32 ~ 33	0.4	微量	39.8	—	—	XQ20	RX	302	H	KT—BO	渗碳, 复氮共渗, 复氮, 光亮淬火, 钎焊, 高速钢淬火
	用城市煤气制备的吸热式氮	吸热式	$\text{CH}_4 + 0.5 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$; $\text{CO}_2 + \text{CH}_4 \rightarrow 2\text{CO} + 2\text{H}_2$	0.4 ~ 0.6	0.0	24 ~ 27	36 ~ 38	0.0	露点 +4℃	36 ~ 39	—	—	XQ20	RX	302	H	KT—BO	渗碳, 复氮共渗, 复氮, 光亮淬火, 钎焊, 高速钢淬火
	木炭靠外部热源加热, 然后通以城市煤气生成的氮	吸热式	$\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$; $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$; $\text{CO}_2 + \text{CH}_4 \rightarrow 2\text{CO} + 2\text{H}_2$; $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$; $\text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4 \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	微量	0.0	22	46	9	露点 -5 ~ -40℃	23	—	—	MQ20	—	—	—	—	高碳钢无脱碳退火, 淬火, 铸件退火
	用工业氮制备的吸热式氮	吸热式	在工业氮中添加少量气体燃料, 在 Ni 催化作用下, 约在 1000℃ 进行吸热式反应, 使其中的 O ₂ 转化为 CO; $\text{C}_n\text{H}_{2n+2} + n/2 \text{O}_2 \rightarrow n\text{CO} + (n+1)\text{H}_2$	微量	0.0	6.7 ~ 7.2	13.7 ~ 14.5	0.0	露点 -6 ~ -18℃	78.3 ~ 79.5	—	—	XQ20	—	—	—	—	渗碳, 光亮淬火, 退火

(续)

类 别	名 称	反应类型	化学反应或制备原理	参考成分 $\varphi(\%)$								各种分类法					安全性	用 途	
				CO ₂	O ₂	CO	H ₂	CH ₄	H ₂ O	N ₂	Ar	He	中国	美 Surface Combustion Co.	美煤气协 会(A. G.A.)	Hotchkiss 和 Webber			俄罗斯
$N_2 + O_2 \rightarrow 2H + 2H + CO + CO$	放热- 放热式 吸热式 氨	放热, 吸热	用甲烷制备时, 首先以接近完全燃烧的 空气-甲烷混合比例产 生 H1 个体积的燃烧 产物, 去除水分后得 到 9.225 体积的气体。 第二步吸热式反应以 7.3 体积的上列燃烧 产物和 1 个体积的甲 烷混合反应产生 10.5 体积的气体	0.0 ~ 0.2	0.0	17	20	0.0	露点 -10 ~ -20℃	其余	—	—	FAQ20	—	501 502	—	—	可燃, 有毒	渗碳, 碳 氮共渗, 光 亮淬火, 复 碳
				0.0	0.0	0.0	75	0.0	露点 -50℃	25	—	—	FAQ50	AX	601	F1	J1A	可燃, 无毒	钎焊, 粉 冶金烧 末结, 表面氧 化物快速还 原, 不锈钢, 硅钢光亮退 火
$N_2 + H_2O + H_2$	氨部分 燃烧式 (富气)	放热式	空气-氨比例约为 1.1:1	0.0	0.0	0.0	20	0.0	露点 +4.4 ~ -73℃	80	—	—	RAQ50	SAX rich	622	F2a	—	可燃, 无毒	硅钢光亮 退火, 不锈 钢处理, 钎 焊, 粉末冶 金烧结
				0.05 ~ 2.0	0.0	0.05 ~ 1.0	50.0 ~ 99.8	0.0	0.0 ~ 3.5	余量	—	—	JXQ50	HX	—	—	—	可燃, 无毒	低碳钢表 面氧化快速 还原, 不锈 钢、硅钢光 亮退火

(续)

类别	名称	反应类型	化学反应或制备原理	参考成分 φ (%)									各种分类法					安全性	用途
				CO ₂	O ₂	CO	H ₂	CH ₄	H ₂ O	N ₂	Ar	He	中国	美 Surface Combustion Co.	美煤气协会 (A. G. A.)	Hotchkiss 和 Webber	俄罗斯		
$N_2 + O_2 + H_2$	精净化放热式氮	放热式	普通放热式气, 在有催化剂作用下, 通有蒸汽使 CO 转化为 CO ₂ , 然后再用碱液、乙醇胺溶液或分子筛除去 CO ₂ 贫气 富气	0.05	0.0	0.05	3.0	0.0	露点 -40℃	97	—	—	JFQ50	HNX lean	—	—	不可燃	铜和低碳钢、不锈钢、硅钢无氧化淬火	
				0.05	0.0	0.05	10.0	0.0	—	90	—	—	JFQ50	HNX rich	—	—	不可燃		
$N_2 + CO + O_2$	用木炭制备的吸热式气	吸热式	木炭靠外部热源加热, 然后通以空气生成的气氮 $C + 2.38 \text{ 空气} \rightarrow CO + 1.88 N_2$	0.5	0.0	32~34	微量	0.0	0.06	其余	—	—	MQ40	—	—	IT-B0	可燃, 有毒	高碳钢光亮淬火, 退火	
				0.0	0.0	0.7	0.7	0.0	露点 -40℃	98.6	—	—	JFQ70	NX lean	201	G2c	ITCO-09		不可燃, 无毒
N_2	用丙烷、丁烷制备的净式放热式气	放热式	放热式贫气用硅胶、冷冻法、乙醇胺溶液、分子筛等吸收 CO ₂ 、H ₂ O	0.05	0.0	1.8	1~2	0.0	0.0	其余	—	—	JFQ70	NX lean	201	G2c	ITCO-09	不可燃, 无毒	铜和低碳钢光亮退火, 中碳钢和高碳钢光亮退火、淬火、回火、高硅钢光亮退火
				0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	露点 +4.4~ -73℃	99	—	—	JFQ70	SAX lean	621	F2b	—	不可燃, 无毒	

(续)

类别	名称	反应类型	化学反应或制备原理	参考成分 $\varphi(\%)$									各种分类法					安全性	用途
				CO ₂	O ₂	CO	H ₂	CH ₄	H ₂ O	N ₂	Ar	He	中国	美 Surface Combustion Co.	美煤气协会 (A. G. A.)	Hotchkiss 和 Webber	俄罗斯		
乙	市售纯氮	空气液化分馏	用添加氢或氨分解气方式在钯分子筛和一定温度下与其中的O ₂ 反应生成 H ₂ O, 然后用分子筛除去 H ₂ O 未除 O ₂ 除 O ₂	0.0 0.0	0.2 0.0	0.0 0.0	0.0 1.0	0.0 0.0	露点 -7 ~ -35℃ -55℃	99.8 99.0	— —	— —	DQ70 DQ70			B ₁ B ₂	— —	不可燃, 无毒	未净化者会引起氧化脱碳; 净化者可用于钢的光洁淬火、退火、回火
	液氮蒸发气	空气液化精馏	空气液化精馏除 O ₂ (沸点 -183℃), 在常压下冷至 -195.8℃, 696.5 个体积的气态 N ₂ 转化为一个体积的液态 N ₂ , 使用时通过蒸发器汽化	0.0	25 × 10 ⁻⁶	0.0	0.0	0.0	露点 -57℃	其余	—	—	DQ70	—	—	—	—	不可燃, 无毒	添加少量甲醇, 可用做无氧化加热保护, 亦可做渗碳时的运载气体
	沸石分子筛空分氮 (MSC 法)	吸附解析	利用 5 × 10 ⁻⁸ cm (5Å) 分子筛对氮的优先选择吸附效应, 把氮富集在分子筛的显微孔中, 然后通过真空解析获得一定纯度的氮	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	露点 < -40℃	99	—	—	DQ70	—	—	—	—	不可燃, 无毒	添加少量甲醇, 可用做无氧化加热保护, 亦可做渗碳时的运载气体
	碳分子筛空分氮 (MSZ 法)	选择吸附	利用氧在碳分子筛微孔中扩散速度比氮大的原理, 分子筛优先吸附氧, 剩余的氮气相即一定纯度的氮。碳分子筛一般采取变压吸附法 (P.S.A 法) 再生	0.0	0.1~3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	露点 < -40℃	97~99.9	—	—	DQ70	—	—	—	—	不可燃, 无毒

(续)

类别	名称	反应类型	化学反应或制备原理	参考成分 φ (%)								各种分类法					安全性	用途
				CO ₂	O ₂	CO	H ₂	CH ₄	H ₂ O	N ₂	Ar	He	中国	美 Surface Combustion Co.	美煤气协会 (A. G. A.)	Hotchkiss 和 Webber		
乙炔	轻柴油 燃烧净化 燃气	放热式	用可使油极度雾化的 燃烧喷嘴,使其燃烧,燃烧产物分子 筛净化	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	露点 -55℃	99.9	—	—	DQ70	—	—	—	不可燃,无毒	添加少量 甲醇,可用 做无氧化加 热保护,亦 可做渗碳时 的运载气体
				0.0	0.2	0.0	99.8	0.0	露点 -50℃	0.0	—	—	QQ60 QQ60	— —	— —	A ₁ A ₂	— —	可燃, 无毒
乙炔	纯氢	电解水	未净化 净化	微量	0.0	33	66	微量	微量	0.0	—	—	YLQ20 YLQ21	—	—	—	可燃, 有毒	渗碳稀释 气、一般加 热保护、氮 基气氛的添 加气
				—	—	50	50	—	—	—	—	—	YLQ31	—	—	—	可燃, 有毒	会引起氧 化脱碳,可 作为稀释气 配其他裂解 气用于渗碳 和保护
有机液体热裂解气																		

(续)

类别	名称	反应类型	化学反应或制备原理	参考成分 $\varphi(\%)$									各种分类法					安全性	用途
				CO ₂	O ₂	CO	H ₂	CH ₄	H ₂ O	N ₂	Ar	He	中国	美 Surface Combustion Co.	美煤气协会(A. G. A.)	Hotchkiss 和 Webber	俄罗斯		
有机液体热裂解气	乙醇热裂解气	吸热式	$C_2H_5OH \rightarrow CO + 3H_2 + [C]$	—	—	25	75	—	—	—	—	—	YLQ30 YLQ31	—	—	—	—	可燃, 有毒	渗碳
	丙酮热裂解气	吸热式	$CH_3COCH_3 \rightarrow CO + 3H_2 + 2[C]$	—	—	25	75	—	—	—	—	—	YLQ31	—	—	—	—	可燃, 有毒	渗碳富 化气
	异丙醇热裂解气	吸热式	$C_3H_7OH \rightarrow CO + 4H_2 + 2[C]$	—	—	20	80	—	—	—	—	—	YLQ30 YLQ31	—	—	—	—	可燃, 有毒	渗碳富 化气
	乙酸乙酯热裂解气	吸热式	$CH_3COOC_2H_5 \rightarrow 2CO + 4H_2 + 2[C]$	—	—	33.3	66.7	—	—	—	—	—	YLQ30 YLQ31	—	—	—	—	可燃, 有毒	渗碳富 化气
	丙胺热裂解气	吸热式	$2CH_3CH_2CH_2NH_2 \rightarrow 9H_2 + 6[C] + 2[N]$	—	—	—	100	—	—	—	—	—	YLQ61	—	—	—	—	可燃	碳氮共 渗
	甲酰胺热裂解气	吸热式	650 ~ 700℃ $HCONH_2 \rightarrow NH_3 + CO$ 400 ~ 600℃ $HCONH_2 \rightarrow HCN + H_2O$	—	—	50	NH ₃ 50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	可燃, 有毒	碳氮共 渗
	三乙醇胺热裂解气	吸热式	$(C_2H_4OH)_3N > 500^\circ C \rightarrow 2CH_4 + 3CO + HCN + 3H_2$	—	—	33	34	22	—	—	—	HCN11	—	—	—	—	—	可燃, 有毒	碳氮共 渗, 氮 共渗

2. 原料气的种类及性质 (表 14-8 ~ 表 14-24 和图 14-21)

表 14-8 我国一些地区天然气成分及其性质

序号	化学成分 φ (%)							
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	丁烷 + 戊烷	不饱和烃	CO	CO ₂	H ₂ S ^① /mg·m ⁻³
1	94 ~ 96	0.5 ~ 1.0	0.2 ~ 0.3	0.1 ~ 0.11	0.05	0.02	~ 0.1	< 10
2	92.36	1.09	0.33	0.17	0.09	0.05	0.169	4.25 体积%)
3	97.84	1.07	0.15	0.1	0.12	0.14	0.21	0.03 (体积%)
4	92.18	4.54	1.2	0.1	0.19		0.3	(CO ₂ + H ₂ S)

序号	化学成分 φ (%)					密度 /kg·m ⁻³	临界压力 /× 0.1MPa	临界温度 /K	热值 ^① /× 4.2kJ·m ⁻³
	总有机硫 /mg·m ⁻³	H ₂	N ₂	He	Ar				
1	80 ~ 250	0.06	~ 2.4	~ 0.01	~ 0.001	0.58	47 ~ 48	190 ~ 195	8300
2	1000 ~ 1200	0.08	0.93			0.596	48.88	199.4	8434.35
3		0.05	0.53	0.05		0.569	47.4	192.7	8634.98
4			1.68			0.654			

① m³ (标准状态)。表 14-9 油田气成分 φ (%)

序号	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈ 以上	H ₂	N ₂	CO ₂
1	90 ~ 93	3 ~ 4	2	0.04	1 ~ 2	0.1
2	77 ~ 90	6 ~ 9	2 ~ 5	0.03 ~ 0.12	0.3 ~ 3	0 ~ 0.02

注：成分为体积分数。

表 14-10 液化气组成

炼制工艺	化学组成 φ (%)						
	CH ₄	C ₂ H ₄ + C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₈	其他
热裂化		21.7	27.4	20.1		24.5	6.3
催化裂化		1.3	8.5	24.5	23.9	33.4	余量
催化裂化		2.41	10.5	31.2	19.04	25.95	余量
延迟焦化	9.5	24.0	24.1	17.9		20.8	3.7
气体分离			76.18	19.95	3.87		
气体分离			95.29	4.71			

注：成分为体积分数。

表 14-11 常用各种煤气的的数据

煤气名称	化学组成 φ (%)							低发热值 /× 4.2kJ·m ⁻³
	CO	H ₂	CH ₄	C _m H _n	O ₂	N ₂	CO ₂ + H ₂ S	
焦炉煤气	4 ~ 8	53 ~ 60	19 ~ 25	1.6 ~ 2.3	0.7 ~ 1.2	7 ~ 13	2 ~ 3	4000 ~ 4500
发生炉煤气 (烟煤)	25 ~ 30	11 ~ 15	1.3 ~ 1.5	0.2 ~ 0.4	0.1 ~ 0.3	47 ~ 54	3 ~ 7	1300 ~ 1450
发生炉煤气 (无烟煤)	24 ~ 30	11 ~ 15	0.5 ~ 0.7	—	0.1 ~ 0.3	47 ~ 54	3 ~ 7	1200 ~ 1250
富氧发生炉煤气	27 ~ 40	20 ~ 40	2.5 ~ 5	0.2 ~ 0.8	0.1 ~ 0.2	10 ~ 45	6 ~ 20	1500 ~ 1800
空气发生炉煤气	32 ~ 33	0.5 ~ 0.9	0.3 ~ 0.5	—	—	64 ~ 66	0.5 ~ 1.5	
水煤气	35 ~ 40	47 ~ 52	0.3 ~ 0.6	—	0.1 ~ 0.2	2 ~ 6	5 ~ 7	2000 ~ 2200
双水煤气	22 ~ 32	42 ~ 50	6 ~ 9	0.5 ~ 1	0.1 ~ 0.2	2 ~ 5	10 ~ 20	2500 ~ 2800

(续)

煤气名称	化学组成 φ (%)							低发热值 $/\times 4.2\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
	CO	H ₂	CH ₄	C _m H _n	O ₂	N ₂	CO ₂ + H ₂ S	
半水煤气 (固定层)	32 ~ 35	36 ~ 37	0.3 ~ 0.5	—	0.2	21 ~ 22	6.2 ~ 9.3	2000 ~ 2200
重油制水煤气	38.6	48.3	2.7	—	0	0.4	10	
重油裂解气	1.5	18.7	42.2	35.0	0.3	2	0.3	

注: 1. 发生炉煤气中杂质含量 (g/m^3) (m^3 为标准状态)。

2. 烟煤为原料: 焦油 10 ~ 30, 污灰 5 ~ 120, 水分 45 ~ 85。

3. 无烟煤为原料: 污灰 2 ~ 12, 水分 20 ~ 80。

表 14-12 城市煤气数据

序号	化学组成 φ (%)									热值 $/4.2\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
	CO ₂	C _m H _n	O ₂	CO	CH ₄	H ₂	N ₂	H ₂ O $/\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	H ₂ S $/\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	
1	2.6	2.2	1.2	13.4	18.4	41.9	20.5		< 9	3700 ~ 3900
2	2.1	3.4	1.0	16.6	18.0	33.4	25.5		< 9	
3	4.4 ~ 4.6	1.4	~ 0.8	21.8 ~ 26.8	10.1 ~ 14.1	48.5 ~ 52.3	3.7 ~ 9.1		< 9	
4	1.8	1.4	0.2	7	19.7	68.1	1.8	11.67	0.34	4170 ~ 4350
5	4 ~ 5	1.5 ~ 2.5	< 1	7 ~ 10	15 ~ 25	40 ~ 55	15 ~ 25		< 20	
6	3.9	4.4	1.1	8.7	24.8	49.6	7.5			4938

表 14-13 液氨技术条件

指标名称	一级品	二级品
氨 (NH ₃) 含量% >	99.8	99.5
水分、油含量% ≤	0.2	0.5

注: 成分为体积分数。

表 14-14 可用来制备可控气氛的气体燃料

序号	气体燃料	密 度			常压下的沸点 $/^{\circ}\text{C}$	发热值 $/4.2\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$	液体化气量	
		空气 = 1	液态 $/\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$	气态 $/\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$			$/\text{m}^3\cdot\text{L}^{-1}$	$/\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$
1	甲烷	0.554	—	—	- 162	9020	—	—
2	丙烷	1.520	0.510	—	- 42	23200	0.278	0.583
3	丁烷	2.070	0.575	—	- 11.7 ~ - 0.6	30100	0.238	0.408
4	工业丙烷	—	—	1.95	—	21200	—	—
5	工业丁烷	—	—	2.51	—	26400	—	—
6	天然气	—	—	0.82	—	9440	—	—
7	发生炉煤气	—	—	1.10	—	1255	—	—
8	高炉煤气	—	—	1.31	—	820	—	—
9	焦炉煤气	—	—	0.57	—	4835	—	—
10	水煤气	—	—	0.90	—	2220	—	—
11	氨	0.590	0.610	—	—	3980	0.860	1.411
12	氢	0.069	—	—	- 253	2890	—	—

(续)

序号	气体燃料	蒸气压力/0.1MPa			在室温下的爆炸范围(燃气的 $\varphi\%$)			最低着火温度 /℃	完全燃烧所需 空气-燃气比例
		-18℃	+21℃	+38℃	下限	上限	范围		
1	甲烷	—	—	—	5.00	15.00	10.00	632	9.52
2	丙烷	1.68	7.85	13.72	2.10	10.10	8.00	481	23.82
3	丁烷	-0.28	1.89	3.85	1.86	8.41	6.55	441	30.47
4	工业丙烷	—	—	—	—	—	—	—	—
5	工业丁烷	—	—	—	—	—	—	—	—
6	天然气	—	—	—	4.90	15.00	10.10	550~750	10.47
7	发生炉煤气	—	—	—	6.50	36.00	29.50	—	1.23
8	高炉煤气	—	—	—	35.00	74.00	39.00	—	0.68
9	焦炉煤气	—	—	—	5.60	30.40	24.80	—	4.99
10	水煤气	—	—	—	6.00	70.00	64.00	—	2.01
11	氢	1.10	7.98	13.80	16.00	27.00	11.00	780	3.57
12	氢	—	—	—	4.00	74.20	70.20	574	2.38

表 14-15 一些气体的密度

N ₂	空气	H ₂	O ₂	CO	CO ₂	H ₂ S	SO ₂
1.2507	1.293	0.09	1.429	1.2501	1.9768	1.5392	2.9268

注: 在0℃, 0.1MPa压力下, 气体的密度 kg/m³。

表 14-16 单体烃的气体密度

气体	分子式	相对分子质量	密度/kg·m ⁻³
甲 烷	CH ₄	16.042	0.7173
乙 烷	C ₂ H ₆	30.068	1.355
丙 烷	C ₃ H ₈	44.094	2.0082
正丁烷	n-C ₄ H ₁₀	58.120	2.696
乙 烯	C ₂ H ₄	28.052	1.2611
丙 烯	C ₃ H ₆	42.078	1.9131
丁 烯	C ₄ H ₈	56.104	2.5923

注: 气体在0℃, 0.1MPa压力下的密度 kg/m³。

表 14-17 单体烃在不同温度下的密度

温度 /℃	丙 烷		正丁烷		异丁烷		乙烯液体 /kg·L ⁻¹	丙烯液体 /kg·L ⁻¹	丁烯液体 /kg·L ⁻¹
	液体 /kg·L ⁻¹	气体 /kg·m ⁻³	液体 /kg·L ⁻¹	气体 /kg·m ⁻³	液体 /kg·L ⁻¹	气体 /kg·m ⁻³			
-40	0.581	2.61					0.461	0.599	0.670
-35	0.575	3.25					0.454	0.594	0.664
-30	0.565	3.87			0.619	1.49	0.443	0.589	0.656
-25	0.559	4.62			0.610	1.65	0.431	0.582	0.647
-20	0.553	5.48			0.606	1.96	0.416	0.574	0.641
-15	0.548	6.40	0.615	1.062	0.600	2.50	0.400	0.567	0.634
-10	0.542	7.57	0.611	1.947	0.594	3.04	0.381	0.561	0.629
-5	0.535	9.05	0.605	2.100	0.588	3.59	0.363	0.552	0.624
0	0.528	10.34	0.600	2.820	0.582	4.31	0.335	0.545	0.619
5	0.521	11.90	0.596	3.350	0.576	5.07		0.538	0.612
10	0.514	13.60	0.591	3.940	0.570	5.92		0.531	0.606
15	0.507	15.51	0.583	4.650	0.565	6.95		0.524	0.606
20	0.499	17.74	0.578	5.390	0.560	7.94			
25	0.490	20.15	0.573	6.180	0.553	9.21			

(续)

温度 /℃	丙 烷		正丁烷		异丁烷		乙烯液体 /kg·L ⁻¹	丙烯液体 /kg·L ⁻¹	丁烯液体 /kg·L ⁻¹
	液体 /kg·L ⁻¹	气体 /kg·m ⁻³	液体 /kg·L ⁻¹	气体 /kg·m ⁻³	液体 /kg·L ⁻¹	气体 /kg·m ⁻³			
30	0.483	22.80	0.568	7.190	0.546	11.50			
35	0.474	25.30	0.562	8.170	0.540	13.00			
40	0.464	28.60	0.556	9.334	0.534	14.70			
45	0.451	34.50	0.549	10.571	0.527	16.80			
50	0.446	36.80	0.542	12.10	0.520	18.94			
55	0.437	40.22	0.536	12.38	0.513	20.56			
60	0.434	44.60	0.532	15.40	0.505	24.20			

表 14-18 单体烃在不同温度的饱和蒸汽压和临界值

温度/℃	饱和蒸汽压/×0.1MPa							
	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	i-C ₄ H ₁₀	n-C ₄ H ₁₀	C ₂ H ₄	C ₃ H ₆	C ₄ H ₈	i-C ₄ H ₈
-40	7.92	1.14			14.7	1.5	0.16	0.23
-35		1.43			16.5	1.8	0.20	0.27
-30	10.85	1.71	0.547		18.8	2.1	0.26	0.31
-25		2.08	0.612		21.8	2.5	0.34	0.35
-20	14.46	2.48	0.742		25.6	3.1	0.43	0.58
-15		2.95	0.920	0.578	29.1	3.8	0.55	0.74
-10	18.91	3.49	1.120	0.812	33.4	4.5	0.70	0.95
-5		4.14	1.360	0.976	37.9	5.2	0.85	1.13
0	24.33	4.82	1.629	1.170	42.9	6.1	1.05	1.38
5		5.56	1.962	1.410		7.0	1.27	1.64
10	30.79	6.46	2.290	1.675		7.9	1.48	1.90
15		7.41	2.582	2.006		8.8	1.72	2.09
20	38.44	8.46	3.115	2.348		9.7	1.95	2.54
25		9.67	3.620	2.744		11.1	2.25	2.89
30	47.36	10.93	4.180	3.202		13.2	2.85	3.52
35		12.31	4.800	3.670		15.1	3.27	4.12
40		13.96	5.510	4.160		16.8	3.76	4.71
45		15.56	6.175	4.859				
50		17.35	7.081	5.451				
55		19.31	7.960	6.210				
60		21.42	8.860	7.030				
临界温度/℃	32.27	96.81	134.98	152.01	9.9	91.89	146.4	144.7
临界压力/×0.1MPa	48.19	42.01	36.0	37.47	50.49	45.4	39.7	39.45

表 14-19 单体烃的比热容

气体	温度 /℃	c _p	c _{pm}	c _r	c _{rm}	c _p	c _{pm}	c _p	c _{pm}
		/×4.2kJ·(kmol·℃) ⁻¹				/×4.2kJ·(kg·℃) ⁻¹		/×4.2kJ·(N·m ³ ·℃) ⁻¹	
CH ₄	0	8.297		6.311		0.5172		0.3702	
	100	9.382	8.791	7.396	6.805	0.5848	0.5480	0.4186	0.3922
C ₂ H ₆	0	11.830		9.844		0.3934		0.5278	
	100	14.849	13.356	12.863	11.370	0.4938	0.4442	0.6625	0.5959
C ₃ H ₈	0	16.32		14.33		0.3701		0.7281	
	100	21.24	18.79	19.25	16.80	0.4817	0.4261	0.9476	0.8383

(续)

气体	温度 /℃	c_p	c_{pm}	c_f	c_{fm}	c_p	c_{pm}	c_p	c_{pm}
		$/ \times 4.2 \text{kJ} \cdot (\text{kmol} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$				$/ \times 4.2 \text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$		$/ \times 4.2 \text{kJ} \cdot (\text{N} \cdot \text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	
$n\text{-C}_4\text{H}_{10}$	0	22.10		20.11		0.3802		0.986	
	100	28.14	25.19	26.15	23.20	0.4842	0.4334	1.2554	1.1238
$n\text{-C}_5\text{H}_{12}$	0	27.45		25.46		0.3805		1.2246	
	100	34.89	31.24	32.90	29.25	0.4836	0.433	1.5566	1.3937
C_2H_4	0	9.78		7.79		0.3486		0.4363	
	100	12.24	11.04	10.25	9.05	0.4363	0.3936	0.5461	0.4925
C_3H_6	0	14.33		12.34		0.3406		0.2933	0.6393
	100	18.09	16.32	16.10	14.33	0.4299	0.3878	0.3406	0.8071
C_4H_8	0	19.88		17.89		0.3543		0.8869	0.8874
	100	25.51	22.76	23.52	20.77	0.4547	0.4057	1.1381	1.0154

表 14-20 单体烃燃烧及爆炸特性数据

项 目			数 据							
			CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C ₂ H ₄	C ₃ H ₆	C ₄ H ₈
理论燃烧空气量 ^①		/m ³ ·m ⁻³	9.52	16.667	23.81	30.953	38.096	14.286	21.429	28.572
理论火焰温度		/℃	2003	2105	2116	2133		2343	2255	2221
燃烧生成物 ^①	CO ₂	/m ³ ·m ⁻³	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	2.0	3.0	4.0
	H ₂ O		2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	2.0	3.0	4.0
	N ₂		7.56	13.24	18.91	24.6	30.25	11.35	17.05	22.7
	合计		10.56	18.24	25.91	33.6	41.25	15.35	23.05	30.7
爆炸极限	下限	(%)	5.0	3.22	2.37	1.86	1.4	3.05	2.0	1.6
	上限		15.0	12.45	9.5	8.41	7.8	28.6	11.1	9.3
最低着火温度		/℃	645	530	510	490		540	455	455
最高火焰速度及可燃气体含量		/m·s ⁻¹ (%)	0.29 10	0.3 6	0.3 4.5	0.3 4.0	0.32 3.0	0.7 7.5		

① m^2 (标准状态)

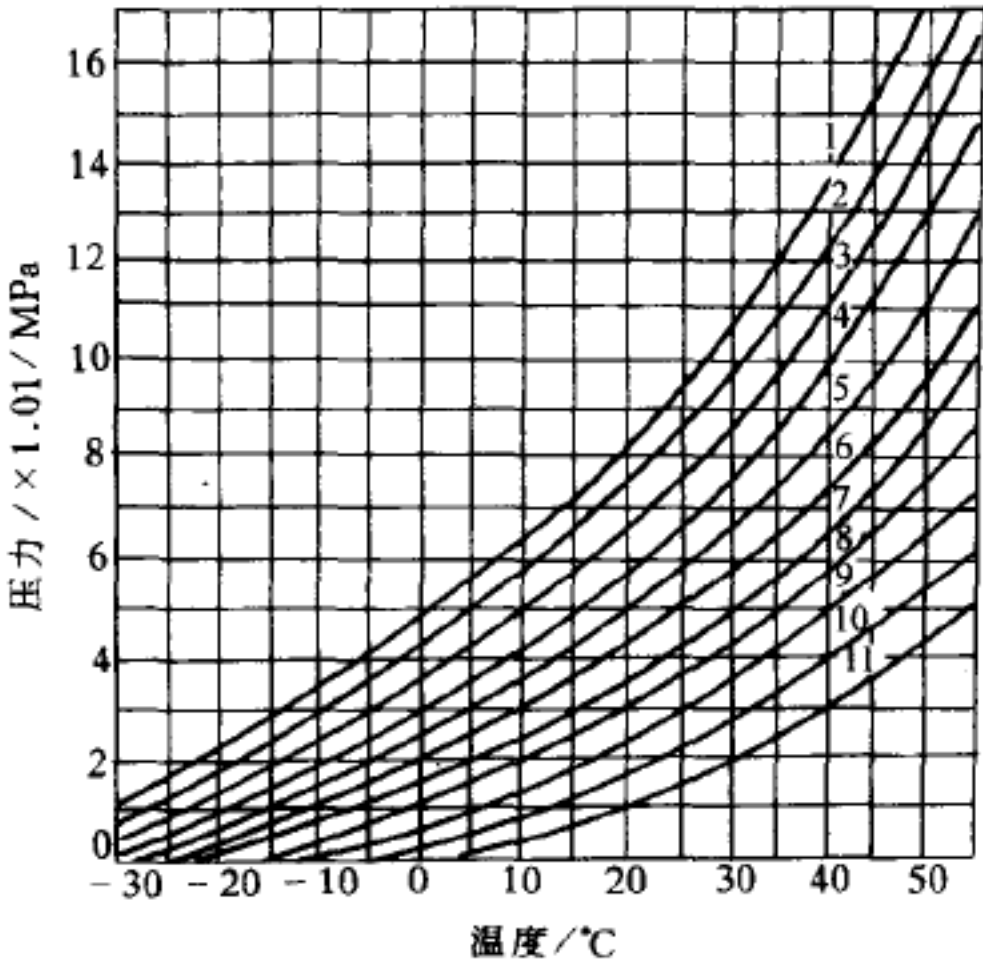


图 14-21 丙烷、丁烷混合气体 (体积分数)

在不同混合比和不同温度下的饱和
蒸气压 (1atm = 1.01325MPa)

- 1— C_3H_8 100% 2— C_3H_8 90% + C_4H_{10} 10%
3— C_3H_8 80% + C_4H_{10} 20% 4— C_3H_8 70%
+ C_4H_{10} 30% 5— C_3H_8 60% + C_4H_{10} 40%
6— C_3H_8 50% + C_4H_{10} 50% 7— C_3H_8 70%
+ C_4H_{10} 60% 8— C_3H_8 30% + C_4H_{10} 70%
9— C_3H_8 20% + C_4H_{10} 80% 10— C_3H_8 10%
+ C_4H_{10} 90% 11— C_4H_{10} 100%

表 14-21 常用有机液体的理化性质

名 称	甲醇	乙醇	异丙醇	苯	丙酮	醋酸乙酯	三乙醇胺	甲酰胺	煤油
分子式	CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH	(CH ₃) ₂ -CHOH	C ₆ H ₆	CH ₃ CO-CH ₃	C ₂ H ₅ -OOCCH ₃	N(CH ₂ -CH ₂ OH) ₃	HCONH ₂	
相对分子质量	32.04	46.07	60.10	78.108	58.011	88.11	149.2	45.04	
相对密度 ρ_4^{20}	0.7913	0.7892	0.7851	0.8790	0.791	0.901	1.1255	1.133	0.81 ~ 0.84
沸点 (1.01MPa℃)	64.7	78.3	82.2	80.10	56.2	77.1	360.0	193	110 ~ 325
闪点/℃	11	11 ~ 13	12		-19	-5	193		28
熔点/℃	-97.1	-114.2	-89.5	5.533	-94.8 (凝点)	-83.6	21.2 (凝点)	2.5	< -10
蒸发潜热/4.2kJ·kg ⁻¹	263	202	160	94.08	125	88			
标准状态蒸气密度 /kg·m ⁻³	1.43	2.06	2.68	3.2970 (常压, 16.5℃)		3.93			
比热容 (20℃) /×4.2kJ·(kg·℃) ⁻¹	0.596	0.572	0.596		0.515	0.459			
熔融热/×4.2kJ·kg ⁻¹	24.6	25.8	21.3			28.4			
临界温度/℃	240	234.3	273.5	289.5	235	256.5			
临界压力/×0.1MPa	81.3	64.4	54.9	48.7	48.6	71.0			
粘度 (20℃)/×10 ⁻³ Pa·s				0.648			613.6 (25℃)		
在水中溶解度 (20℃)(%)重量	∞	∞	∞		∞	8.6	全溶		
爆炸极限 (%体积)	下限	5.5	3.1	2	1.41	2.1	2.3		1.0
	上限	36.5	20	12	6.75	13	11.4		7.5
自燃点/℃	470	425	400	580	540				435
卫生允许浓度/mg·L ⁻¹	0.05	1.5	0.2	0.1	0.4	0.2			

表 14-22 几种有机液体在不同温度下分解产物的组成

有机液体	温度 /℃	气体组成 φ (%)				
		CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C _m H _n
乙酸甲酯 CH ₃ COOCH ₃	950	1.5	46.6	38.2	10.3	0.3
	850	2.5	41.3	35.2	13.3	0.4
	750	3.1	40.5	33.8	14.2	0.6
	650	3.7	39.3	32.3	15.5	0.8
乙醇 C ₂ H ₅ OH	950	1.0	30.7	53.7	11.7	0.3
	850	1.5	29.3	49.3	13.6	0.7
	750	1.7	26.2	49.8	14.2	0.9
	650	1.9	24.2	47.8	15.3	1.3
异丙醇 (CH ₃) ₂ CHOH	950	0.8	28.2	47.8	18.5	3.2
	850	1.0	24.5	44.3	20.8	7.3
	750	1.5	21.6	40.5	22.6	8.8
	650	1.8	16.9	39.8	21.3	12.4

表 14-23 一些常用有机物质的碳当量

物质	分子式	相对分子质量	渗碳反应	碳当量/g
甲烷 ^①	CH ₄	16	CH ₄ →[C]+2H ₂	16
甲醇	CH ₃ OH	32	CH ₃ OH→CO+2H ₂	—
乙醇	C ₂ H ₅ OH	46	C ₂ H ₅ OH→[C]+CO+3H ₂	46
乙酸乙酯	CH ₃ COOC ₂ H ₅	88	CH ₃ COOC ₂ H ₅ →2[C]+2CO+4H ₂	44
异丙醇	C ₃ H ₇ OH	60	C ₃ H ₇ OH→2[C]+CO+4H ₂	30
丙酮	CH ₃ COCH ₃	58	CH ₃ COCH ₃ →2[C]+CO+3H ₂	29

① 甲烷是为了对比而列入的。

表 14-24 几种有机液体的产气量 (单位: L/mL)

液体名称	产气量	液体名称	产气量	液体名称	产气量
苯	0.42	甲醇	1.66	柄酮	1.23
煤油	0.73	焦苯	0.58	乙醇	1.55

3. 气氛的制备

(1) 吸热式气氛 (图 14-22 和表 14-25 ~ 表 14-27)

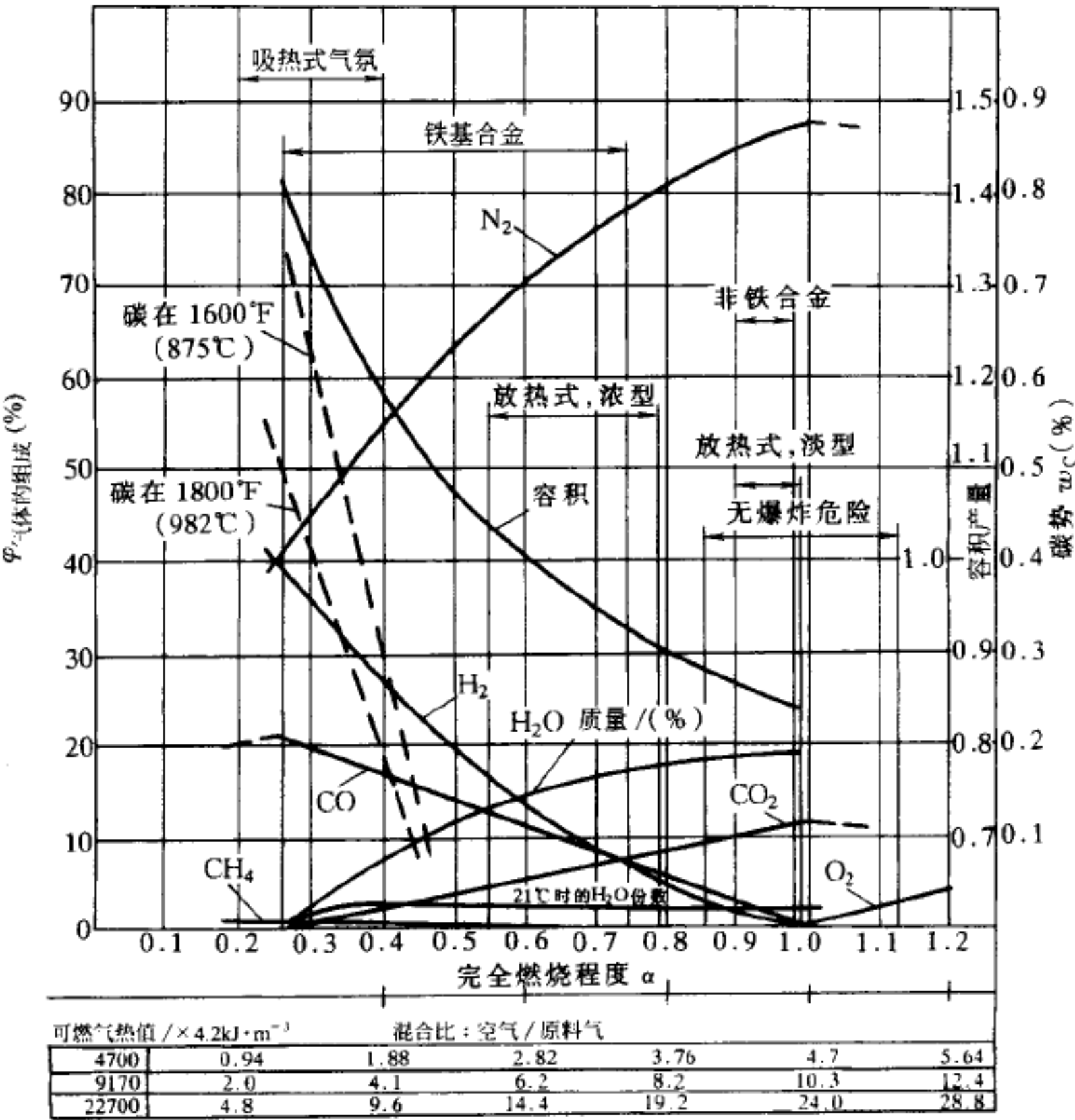


图 14-22 完全燃烧程度和产气成分的关系

表 14-25 制备吸热式气氛对原料要求

成 分	天然气	液化石油气	成 分	天然气	液化石油气
甲烷	$\geq 90\%$ (体积)	$\geq 90\%$ (体积) $\leq 5\%$ (体积)	戊烷以上	$\leq 50 \times 10^{-6}$ (重量) 无	$\leq 2\%$ (体积) $\leq 50 \times 10^{-6}$ (重量) 无
丙烷 (或丁烷)			硫化氢		
烯烃			游离水分		

表 14-26 几种原料气制备吸热式气氛特性

原料气	混合比	产气倍数	1kg 原料气	1kg 原料气	吸热式气氛组分 φ (%)					
	空气/原料气	产气/原料气	产气量/ m^3	需空气量/ m^3	CO_2	CO	H_2	H_2O	CH_4	N_2
甲烷 (CH_4)	2.38	4.88	6.83	3.33	0.3	20.49	40.98	0.5	0.5	余
丙烷 (C_3H_8)	7.14	12.64	6.43	3.64	0.3	23.74	31.64	0.5	0.5	余
丁烷 (C_4H_{10})	9.52	16.52	6.38	3.68	0.3	24.21	30.26	0.5	0.5	余

表 14-27 吸热式气体成分及气体发生量

燃料	混合比 (空气/ 燃料)	气体组成 φ (%)							露点 / $^{\circ}\text{C}$	气体发生量	
		CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2	H_2O		$\text{m}^3_{\text{气体}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{燃料}}$	$\text{m}^3_{\text{气体}} \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{燃料}}$
天然气	2.5	0.3	0.0	20.9	40.7	0.4	其余	0.36	0	5	7
丙烷	7.2	0.3	0.0	24.0	33.4	0.4	其余	0.6	0	12.6	6.41
丁烷	9.6	0.3	0.0	24.2	30.3	0.4	其余	0.6	0	16.52	6.38
城市煤气 ^①	0.4~0.6	2~0	0.0	27~25	48~41	3~2	其余	0.12	-20	—	—

① 该数字系根据化学反应粗略计算结果。计算采用的城市煤气成分 φ (%) 为： CO_2 2~4, O_2 0.5~1.0; C_mH_n 2~3, CO 15~20, H_2 45~55, CH_4 20~30, S 43~57 mg/m^3 。

(2) 放热式气氛 (图 14-23 及表 14-28 和表 14-29)

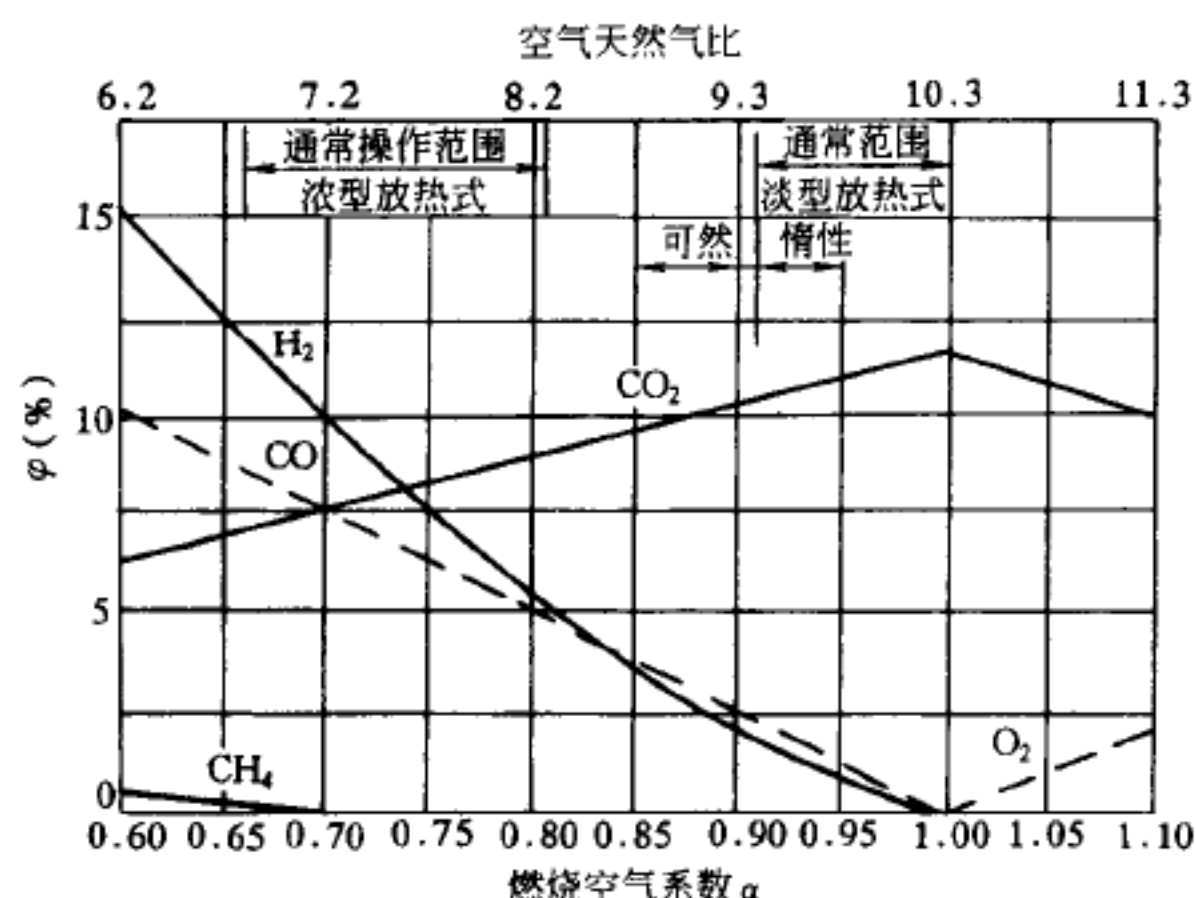
图 14-23 放热式气氛成分与 α 、空气/天然气比的关系

表 14-28 放热-吸热式气氛的成分

类别	气体成分 φ (%)					露点 / $^{\circ}\text{C}$	制备 100m^3 气体需要的 天然气/ m^3
	N_2	CO	CO_2	H_2	CH_4		
贫气	63.0	17.0	0.0	20.0	0.0	-57	12
富气	60.0	19.0	0.0	21.0	0.0	-46	22

表 14-29 常用原料气的混合比

原料气种类	放热式气氛类型	
	浓 型	淡 型
甲烷	5.2 ~ 7.6	8.6 ~ 9.3
丙烷	13.1 ~ 19	21.4 ~ 23.3
丁烷	17 ~ 24.7	27.8 ~ 30.2

(3) 氨制备气氛 (图 14-24 及表 14-30 和表 14-31)

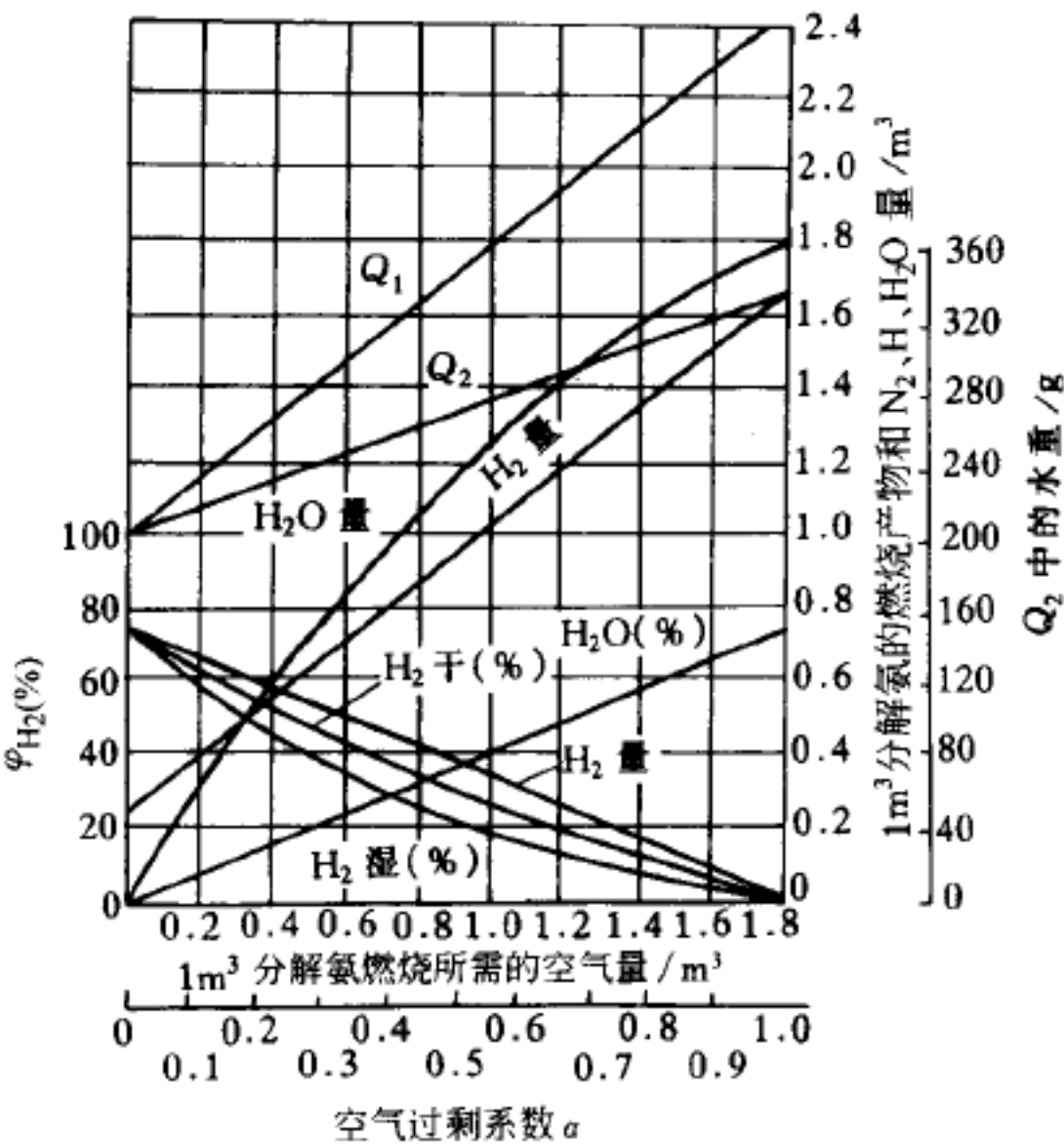


图 14-24 氨燃烧气氛的燃烧产物体积和气体成分

Q_1 —湿燃烧产物体积 Q_2 —干燃烧产物体积

表 14-30 不同温度下氨的分解程度

温度 /℃	平衡常数 K_p	残余氨含量 φ (%)	氨分解率 (%)	温度 /℃	平衡常数 K_p	残余氨含量 φ (%)	氨分解率 (%)
300	191.88	2.24	95.62	700	181.3×10^4	0.025	99.95
350	1077.83	0.97	98.08	750	358.37×10^4	0.017	99.965
400	4772.58	0.466	99.07	800	66947×10^4	0.013	99.974
450	174.79×10^2	0.244	99.51	850	119.06×10^5	0.0103	99.979
500	548.74×10^2	0.139	99.72	900	202.79×10^5	0.0073	99.985
550	151.76×10^2	0.083	99.83	950	332.47×10^5	0.0059	99.988
600	377.6×10^3	0.053	99.89	1000	526.95×10^5	0.00498	99.99
650	859.41×10^3	0.035	99.93				

表 14-31 氨制备气氛的成分

类别	成分 φ (%)		露点 /℃	制备 100m ³ 气体需要的 NH ₃ /kg	安全性
	N ₂	H ₂			
氨加热分解气	25	75	- 51	36.4	可燃、易爆
氨近安全燃烧气	99	1	+ 4.4 ~ - 73	22.2	中性, 不可燃
氨部分燃烧气	80	20	+ 4.4 ~ - 73	24.2	可燃

注: 在 20℃1 个大气压下, 1kg 的液氨可气化成 1.39m³ 的气体。

(4) 有机液体分解气氛 (图 14-25 ~ 图 14-27)

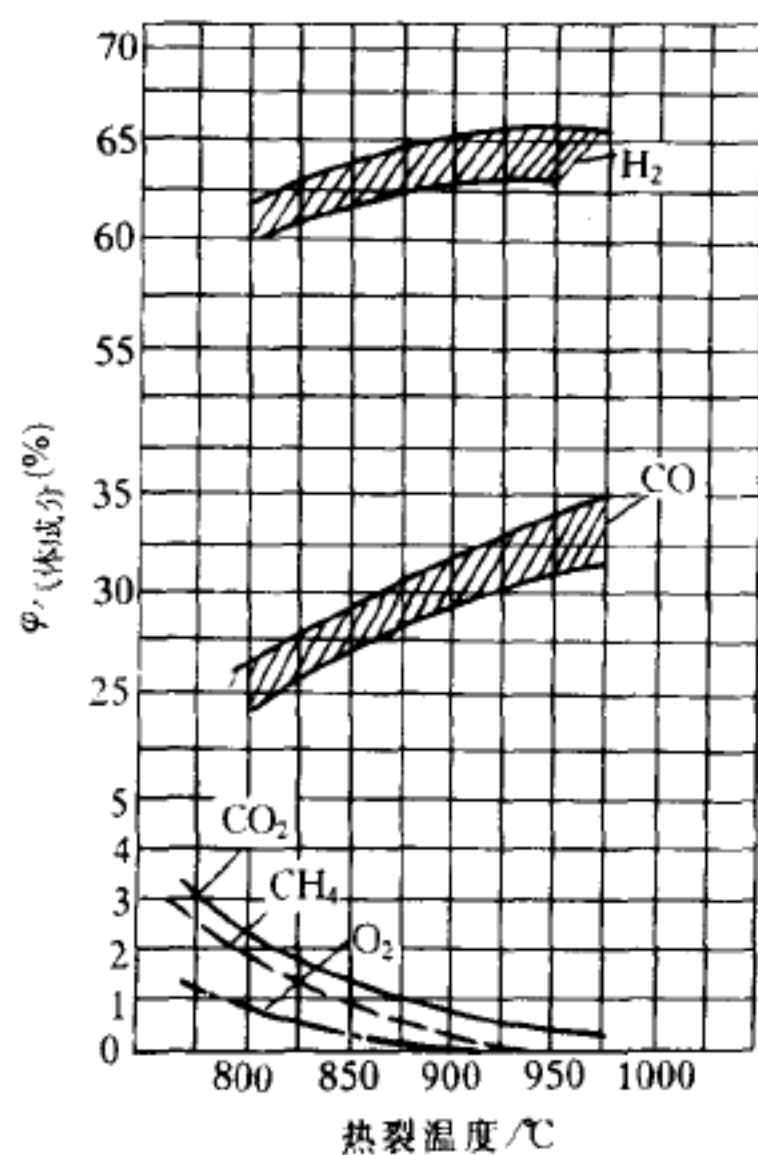
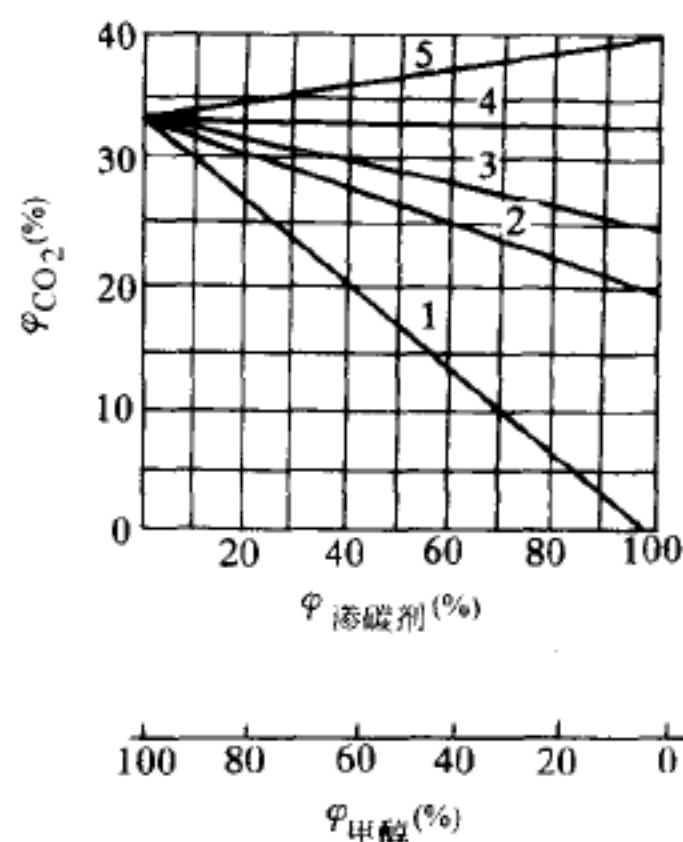
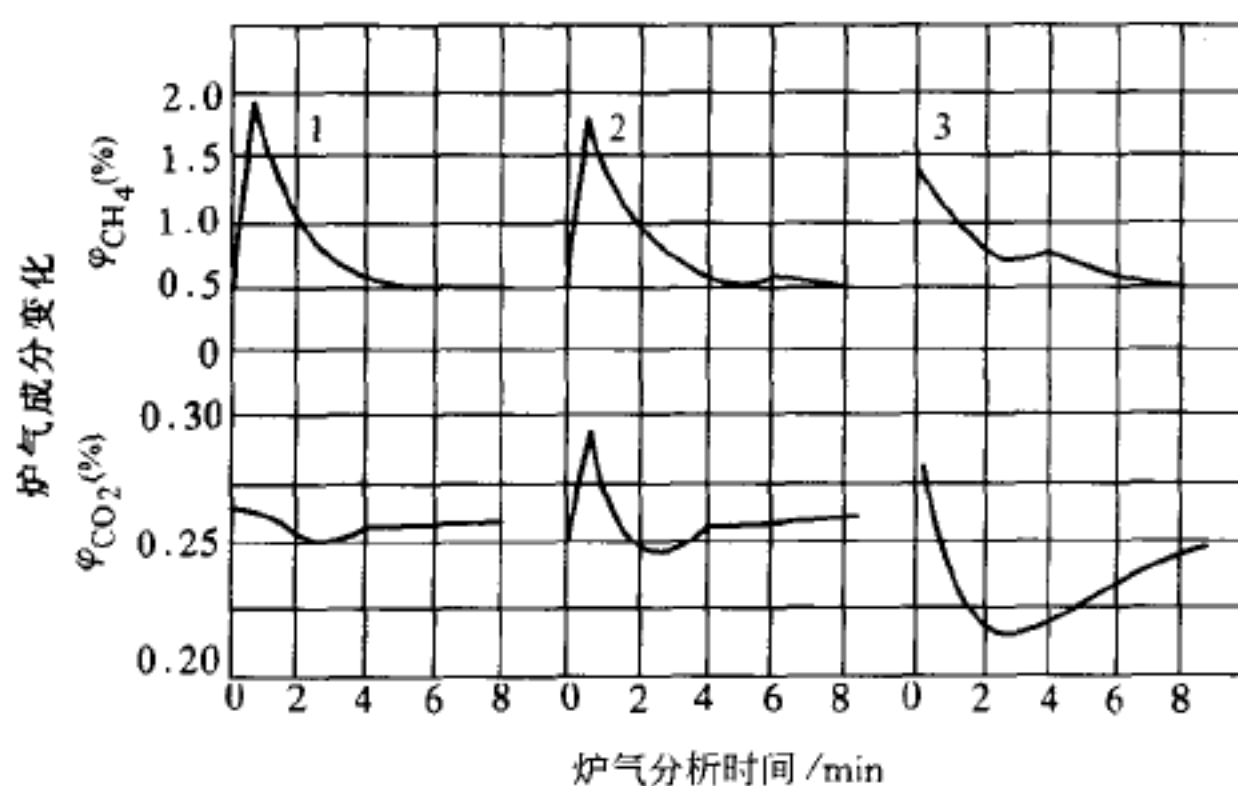


图 14-25 甲醇热分解曲线

图 14-26 不同渗碳液与甲醇
混合时炉气中 CO 含量的影响渗碳剂及理想的渗碳反应：1— $C_3H_8 \rightarrow 3[C] + 4H_2$ 2— $C_3H_7OH \rightarrow 2[C] + CO + 4H_2$ 3— CH_3COCH_3 → $2[C] + CO + 3H_2$ 4— $CH_3COOC_2H_5 \rightarrow 2[C]$ + $2CO + 4H_2$ $CH_3COOCH_3 + CH_3COCH_3 \rightarrow 3[C]$ + $3CO + 6H_2$ 5— $CH_3COOCH_3 \rightarrow [C] + 2CO + 3H_2$ 图 14-27 渗碳液分解时 CH_4 和 CO_2 变化规律曲线

1—注入 4.5mL 丙酮后 2—注入 6mL 醋酸乙酯后 3—注入 4mL 煤油后

4. 热处理炉气氛消耗量 (表 14-32 ~ 表 14-34)

表 14-32 各种热处理炉可控气氛消耗

炉 型	可控气氛消耗 (× 炉膛容积)
RJJ 井式渗碳炉	2.5 ~ 3 (马弗罐容积)
一般井式炉	4.5 ~ 6
密封箱式炉	8 ~ 12
连续式渗碳炉	2.5 ~ 3
振底炉、输送带炉 (有密封加料装置)	2.5 ~ 3

表 14-33 可控气氛渗碳炉通气量

序号	设备型式	炉膛容积 /m ³	通气量 /m ³ ·h ⁻¹	换气次数	炉膛压力 /Pa
1	连续式推杆炉	12.7	30~35	2.4~2.8	100~170
2	连续式推杆炉	10.0	28~30	2.8~3.0	200~350
3	连续式推杆炉	9.0	24~30	2.7~3.3	100~120
4	密封箱式炉	1.5	8~15	5.3~10	100~250
5	密封箱式炉	1.4	12	8.6	80~120
6	密封箱式炉	4.27	22	5.2	
7	密封箱式炉	2.55	12	4.7	
8	密封箱式炉	1.17	6.7	5.7	

注：1. 炉膛容积系指炉膛充气容积，不是有效容积。

2. 密封箱式炉的通气量未包括缓冷室。

表 14-34 渗碳时 RJJ 炉载体气滴注液甲醇消耗量

炉型 RJJ	105	90	75	60	35	25
料筐尺寸/mm	φ600×1200	φ600×900	φ450×900	φ450×600	φ300×600	φ300×450
消耗量/mL·h ⁻¹	720	600	420	340	240	180

14.3 炉气碳势控制

1. 炉气碳势控制方法和基础（表 14-35 ~ 表 14-38 和图 14-28 ~ 图 14-30）

表 14-35 气氛碳势控制方法

类别	控制方法	理论基础		备 注
		反应式	平衡常数	
间接法	露点仪法	$C + H_2O \rightleftharpoons CO + H_2$	$K_2 = \frac{p_{H_2} \cdot p_{CO}}{p_{H_2O}}$	取样过程中易引起误差
	红外线分析仪法	$C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$ $C + 2H_2 \rightleftharpoons CH_4$	$K_2 = \frac{p_{CO}^2}{p_{CO_2}}$ $K_3 = \frac{p_{CH_4}}{p_{H_2}^2}$	
	氧探头法	$C + \frac{1}{2}O_2 \rightleftharpoons CO$	$K_4 = \frac{p_{CO}}{p_{\frac{1}{2}O_2}}$	直接测量气氛中的微量含氧量精度较高
直接法	电阻探头法	γ-Fe 中碳含量与电阻有线性关系		可直接测量细铁丝的碳含量，即气氛的碳势

表 14-36 在 925℃ 炉气碳势为 0.8% 时的各种分析方法的比较

原 理	仪器名称	灵敏度	应答速度/min	炉温变动 ±10℃ 时的变化
测定露点	LiCl 露点仪	$w_C \pm 0.05\%$	12~15	$w_C \pm 0.04\%$
测定 CO ₂	红外线分析仪	$w_C \pm 0.02\%$	10~20s	$w_C \pm 0.06\%$
电阻法	铁丝电阻仪	$w_C \pm 0.04\%$	7 (φ0.05mm)	$w_C \pm 0.06\%$
		$w_C \pm 0.04\%$	18 (φ0.1mm)	$w_C \pm 0.06\%$
氧势法	ZrO ₂ 氧探头	$w_C \pm 0.015\%$	0s	$w_C \pm 0.04\%$

表 14-37 LiCl 感湿元件平衡温度和气体露点的关系

露点 /℃	平衡温度 /℃	露点 /℃	平衡温度 /℃	露点 /℃	平衡温度 /℃	露点 /℃	平衡温度 /℃	露点 /℃	平衡温度 /℃
-30	-9.7	-20	5.3	-10	20.3	0	35.3	10	48.5
-29	-8.2	-19	6.8	-9	21.8	1	36.6	11	50.0
-28	-6.7	-18	8.3	-8	23.3	2	37.8	12	51.4
-27	-5.2	-17	9.8	-7	24.8	3	39.2	13	52.8
-26	-3.7	-16	11.3	-6	26.3	4	40.4	14	54.3
-25	-2.2	-15	12.8	-5	27.8	5	41.7	15	55.8
-24	-0.7	-14	14.3	-4	29.3	6	43.0	16	57.2
-23	+0.8	-13	15.8	-3	30.8	7	44.4	17	58.7
-22	2.3	-12	17.3	-2	32.3	8	45.7	18	60.2
-21	3.8	-11	18.8	-1	33.8	9	47.1	19	61.2

表 14-38 气体露点与水蒸气含量关系

露点 $\theta/^\circ\text{C}$	$1 \times 10^{-6} (\varphi)$	露点 $\theta/^\circ\text{C}$	$1 \times 10^{-6} (\varphi)$	露点 $\theta/^\circ\text{C}$	$1 \times 10^{-6} (\varphi)$	露点 $\theta/^\circ\text{C}$	$1 \times 10^{-6} (\varphi)$
-100	0.138	-20	1015	+1	6180	+22	26120
-90	0.0953	-19	1118	+2	6953	+23	27736
-80	0.54	-18	1231	+3	7487	+24	29477
-70	2.57	-17	1356	+4	8022	+25	31219
-60	10.7	-16	1480	+5	8595	+26	33209
-55	20.6	-15	1630	+6	9216	+27	35200
-50	39.4	-14	1779	+7	9875	+28	37312
-48	49.6	-13	1953	+8	10584	+29	39551
-46	63.0	-12	2140	+9	11318	+30	41791
-44	80.1	-11	2338	+10	12114	+35	55472
-42	101.5	-10	2562	+11	12935	+40	71761
-40	126.9	-9	2798	+12	13806	+45	94527
-38	158.0	-8	3047	+13	14800	+50	120398
-36	197.8	-7	3333	+14	15796	+55	155472
-34	245	-6	3632	+15	16791	+60	196517
-32	303	-5	3955	+16	17885	+70	307212
-30	374	-4	4303	+17	19030	+80	467662
-28	461	-3	4690	+18	20396	+90	691542
-26	564	-2	5100	+19	21641	+100	1000000
-24	689	-1	5547	+20	23020		
-22	840	0	6020	+21	24502		

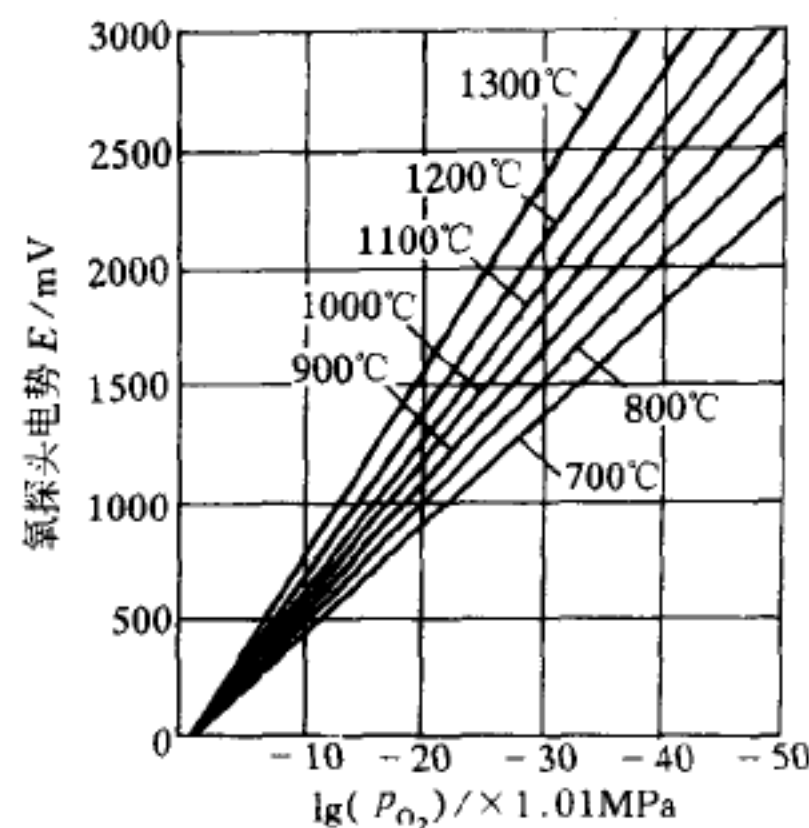


图 14-28 氧电势与氧分压的关系

$$E = - (3.403 \times 10^{-5} T + 4.961 \times 10^{-5} T \lg p_{O_2})$$

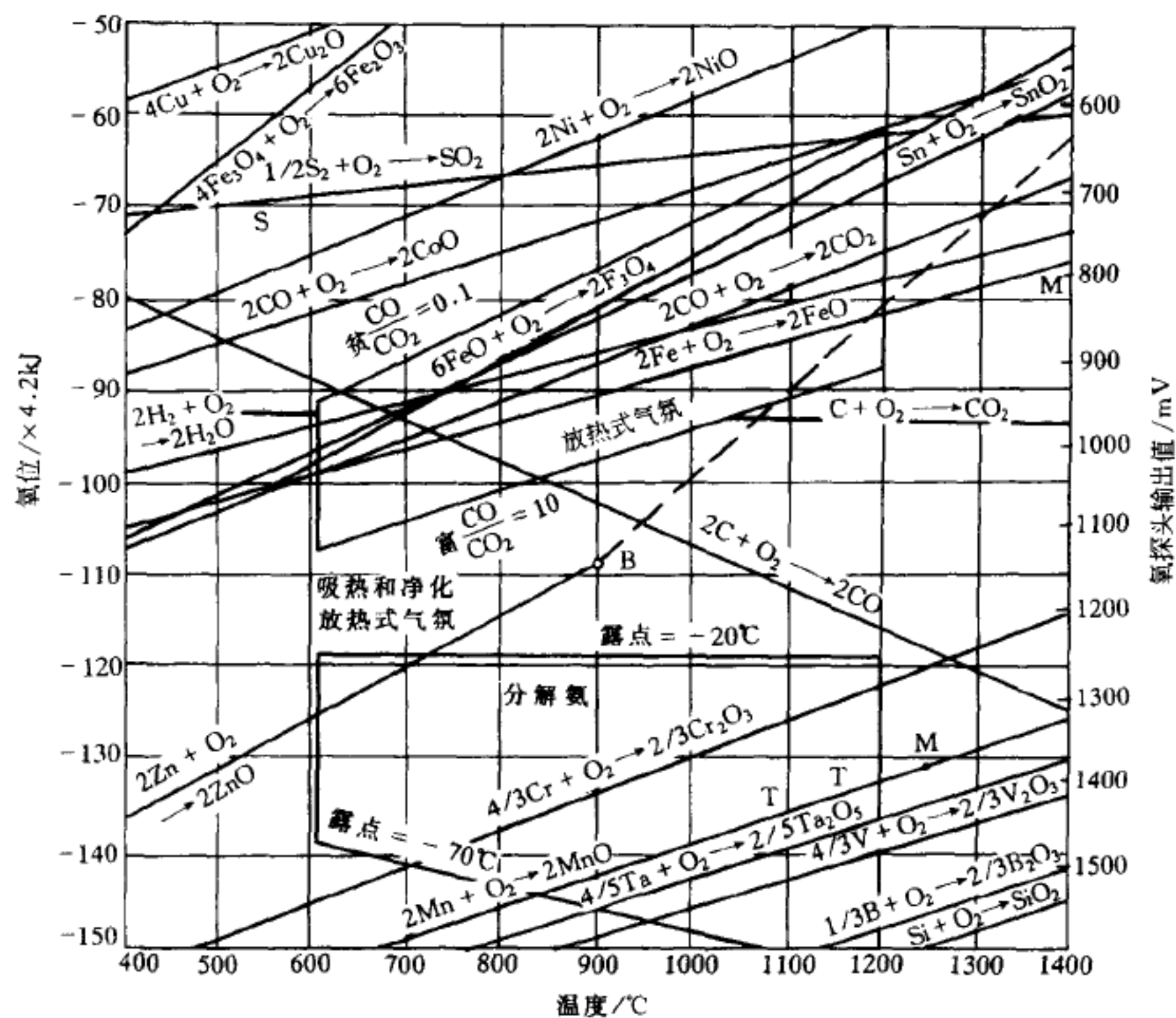
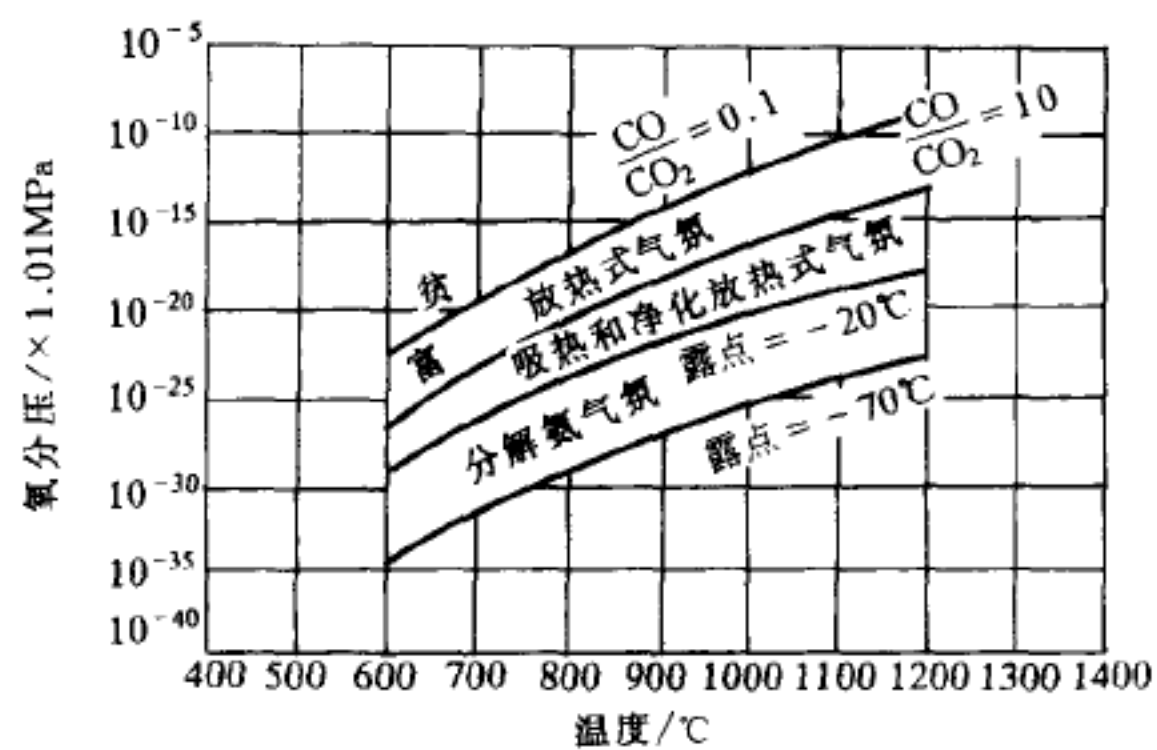


图 14-29 各种元素在不同温度的氧位

图 14-30 几种气氛氧分压和 $\frac{\text{CO}}{\text{CO}_2}$ 比例及露点的关系

2. 电阻法 (图 14-31 和图 14-32)

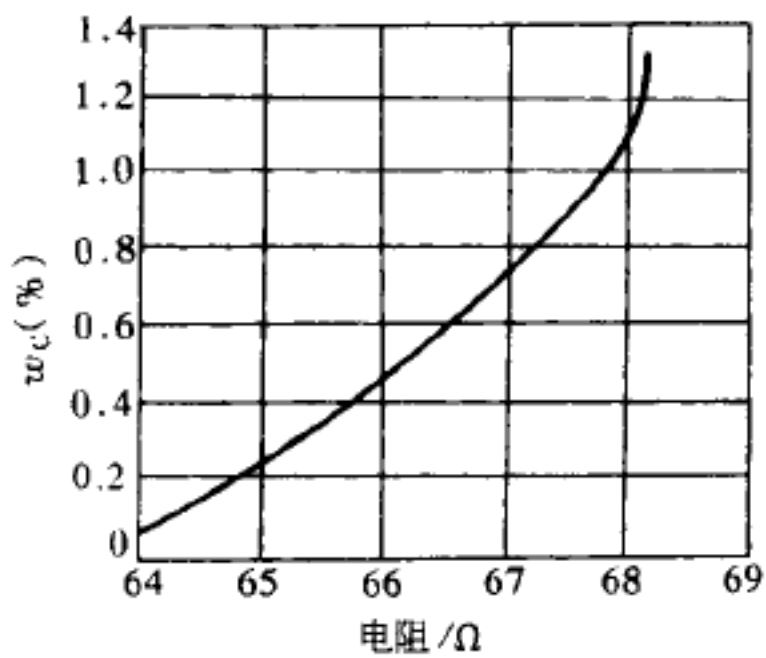


图 14-31 Fe-Ni 合金碳含量和电阻值的关系

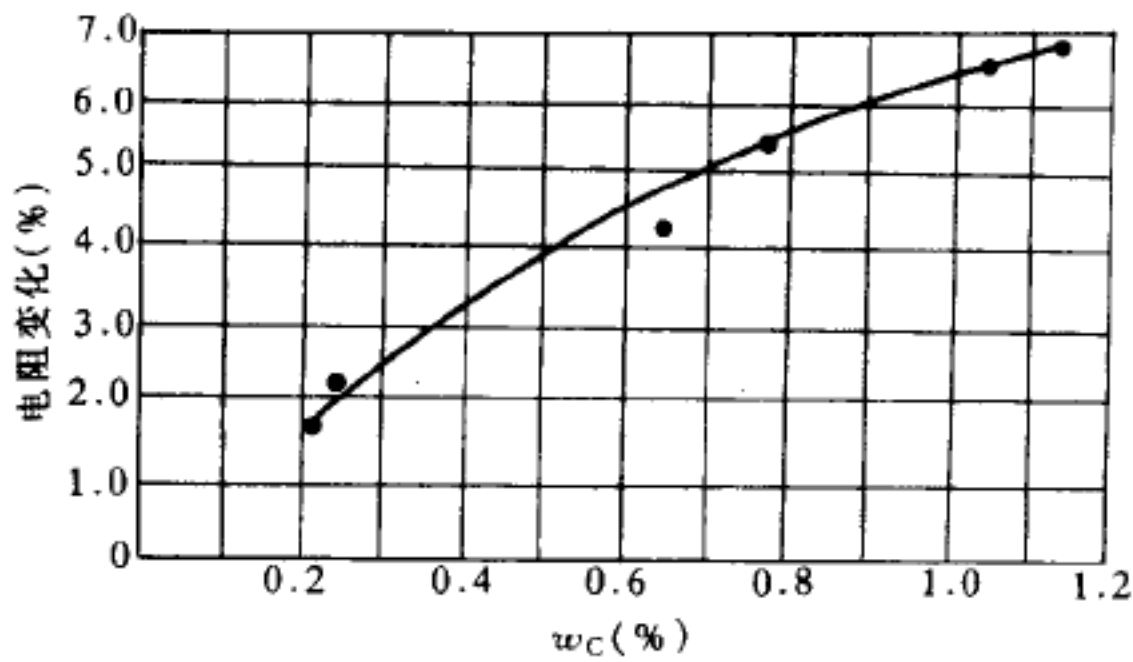


图 14-32 低碳钢丝增碳后电阻值的变化率

3. CO₂ 红外分析法 (图 14-33 ~ 图 14-38)

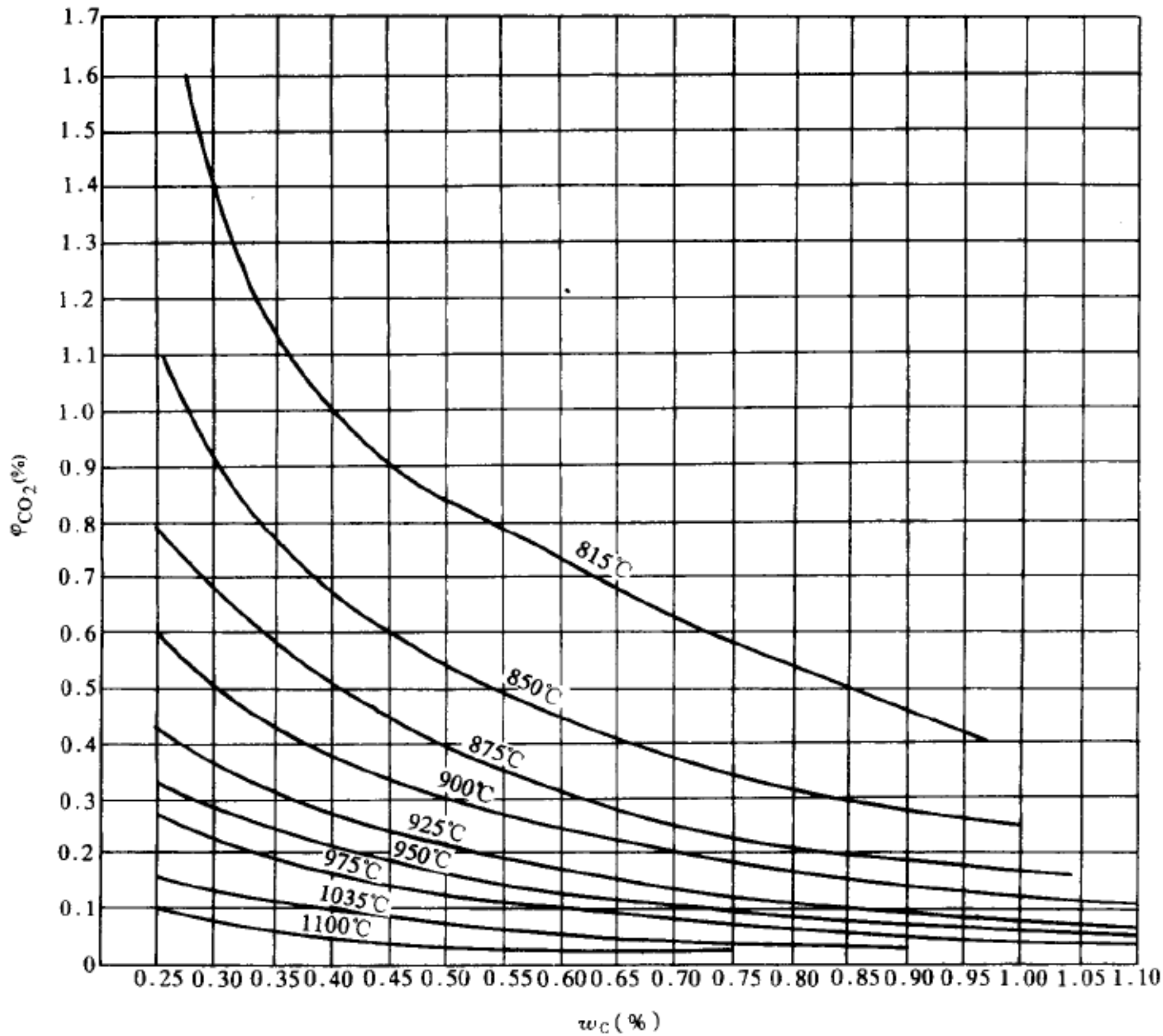


图 14-33 甲烷为原料的吸热式气氛中 CO₂ 与碳钢中碳含量及温度的关系

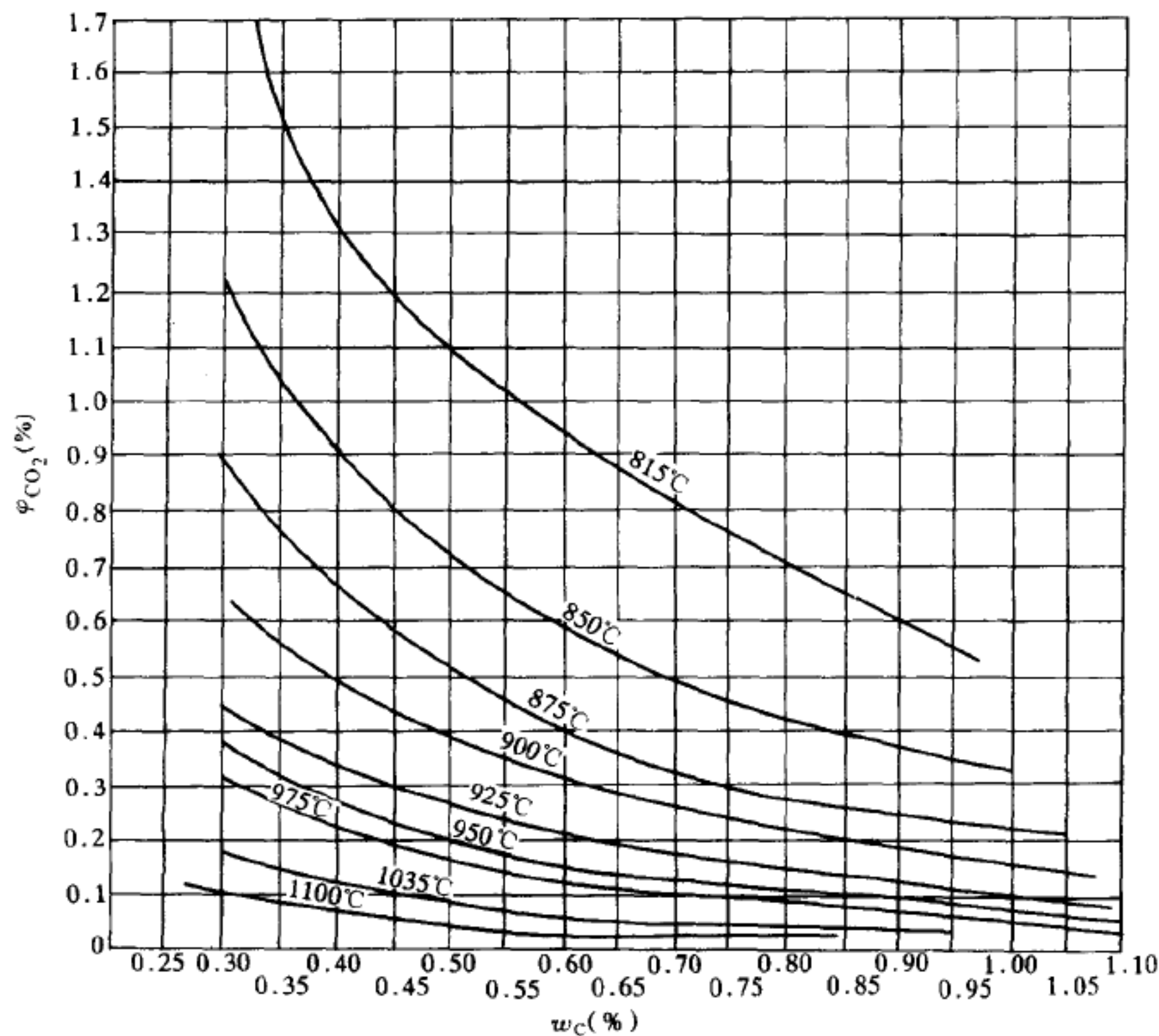


图 14-34 丙烷为原料的吸热式气氛中 CO_2 与碳钢中碳含量及温度的关系

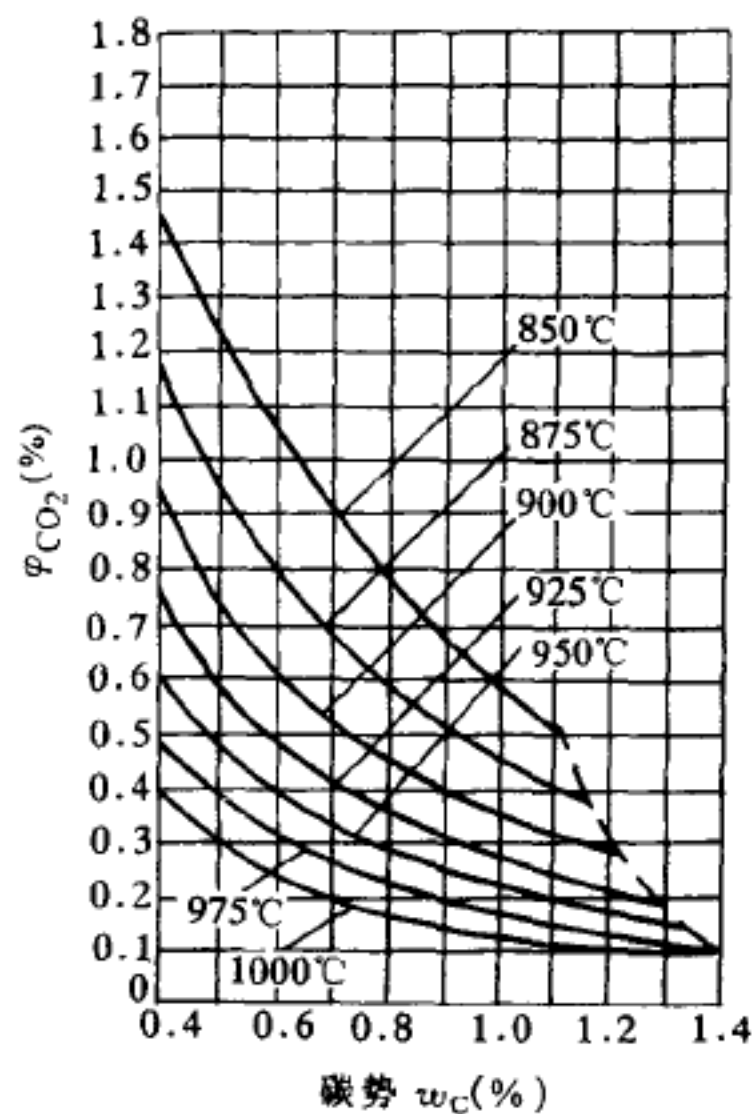


图 14-35 滴注式气氛碳势与 CO_2 和温度的关系

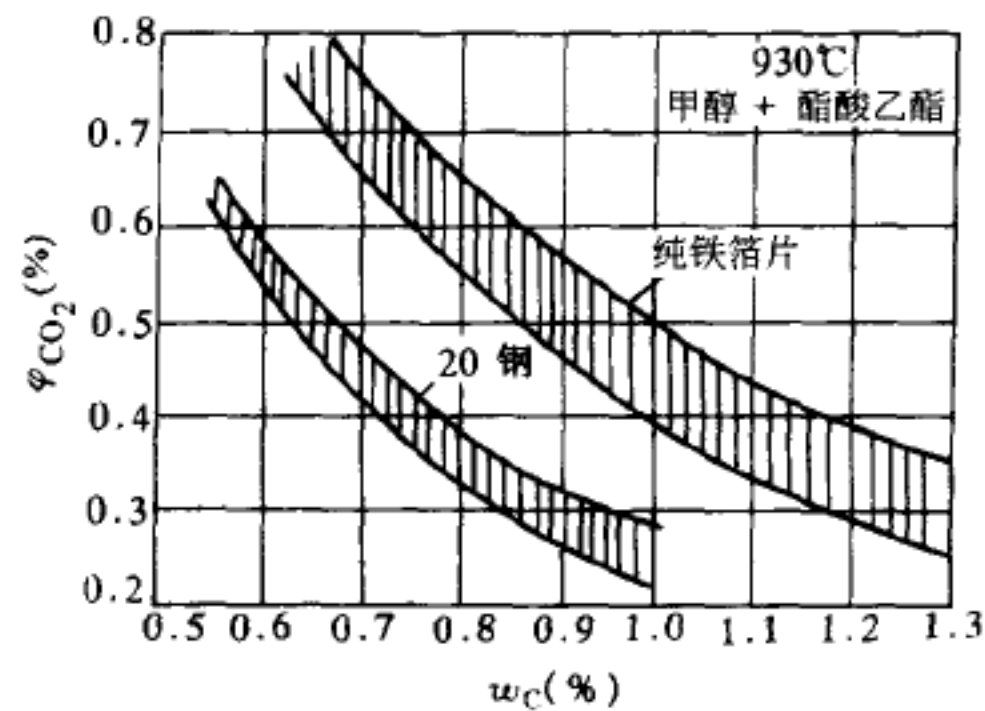


图 14-36 滴注式气氛碳势与 CO_2 关系曲线

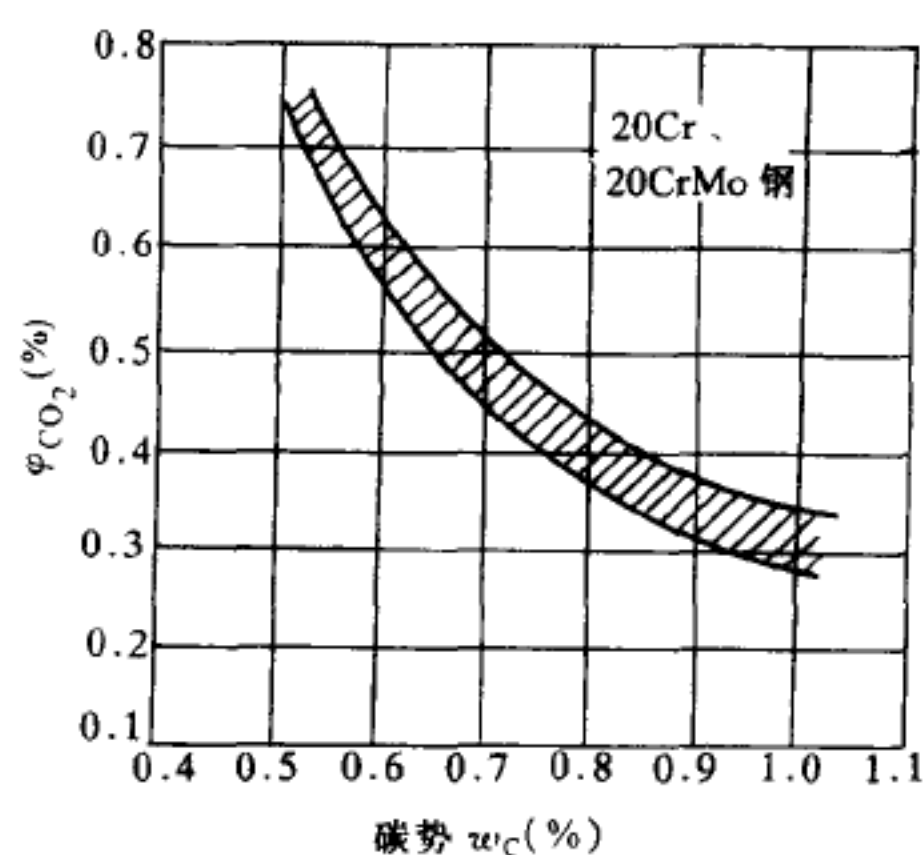


图 14-37 碳势 CO_2 经验平衡曲线
(20Cr、20CrMo 钢剥层, RJJ-75 炉,
甲醇+醋酸乙酯滴注液, 红外线 CO_2
分析仪注射泵自控)

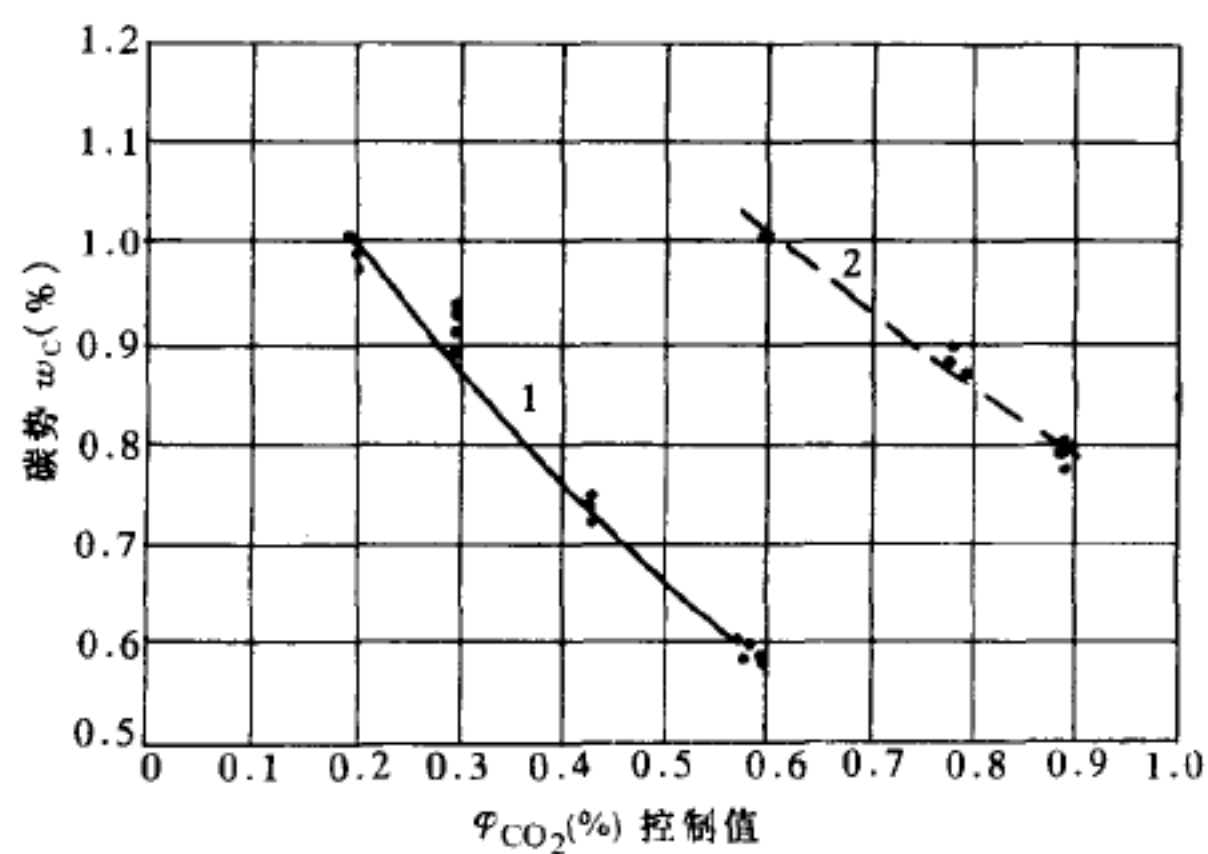


图 14-38 碳势 CO_2 经验平衡曲线 (钢箔片,
60kW 密封箱式炉, 甲醇+煤油滴注液,
红外线 CO_2 分析仪电磁阀自控)
1—930℃ 2—850℃

4. 露点法 (图 14-39 ~ 图 14-44)

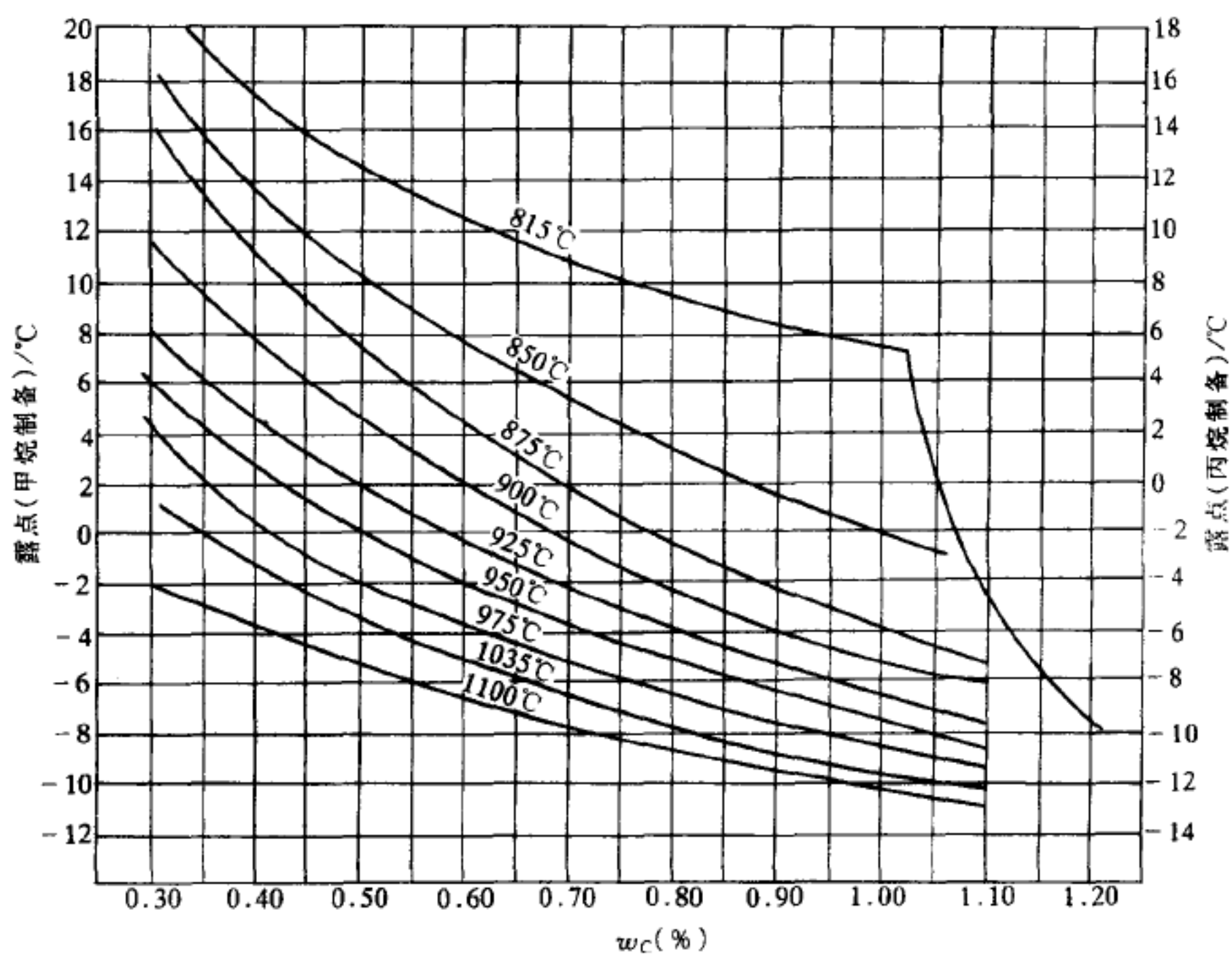


图 14-39 碳钢的碳含量与吸热式气氛的露点在不同温度的关系

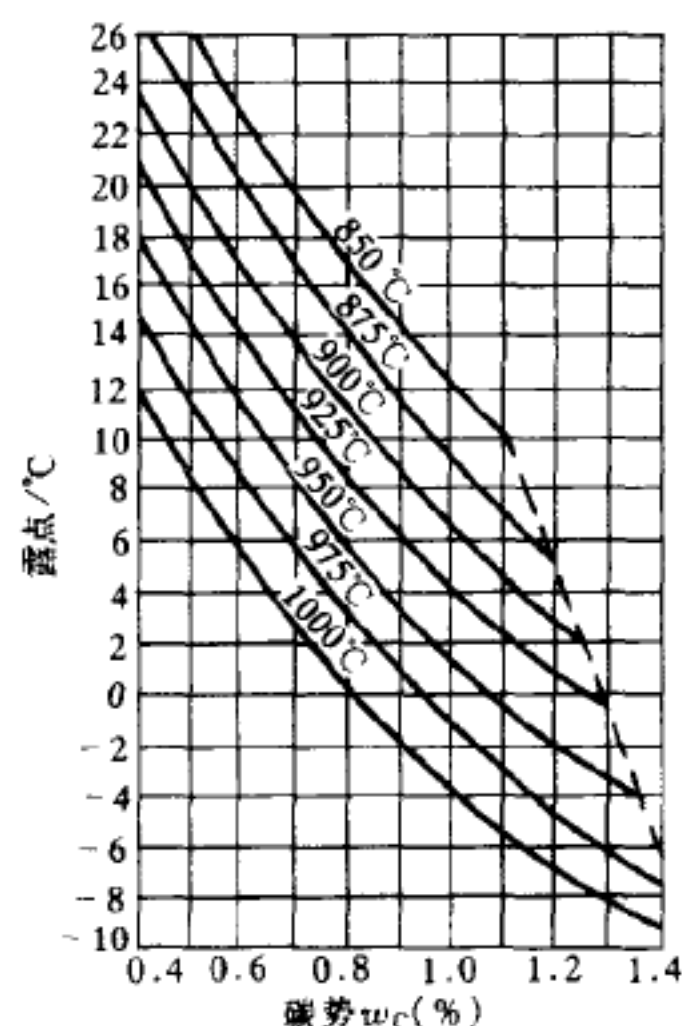


图 14-40 滴注式气氛碳势与露点和温度的关系

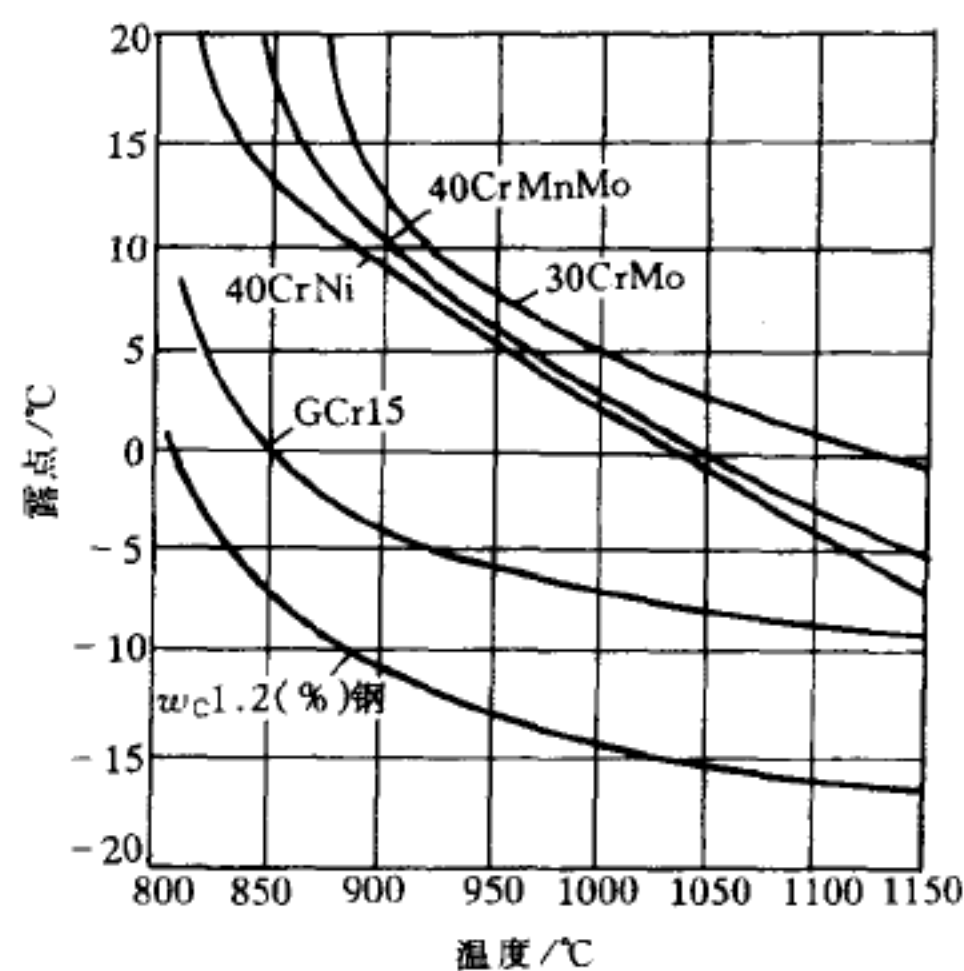


图 14-41 几种碳钢和合金钢在吸热式气氛(用甲烷制备)中的实测平衡曲线

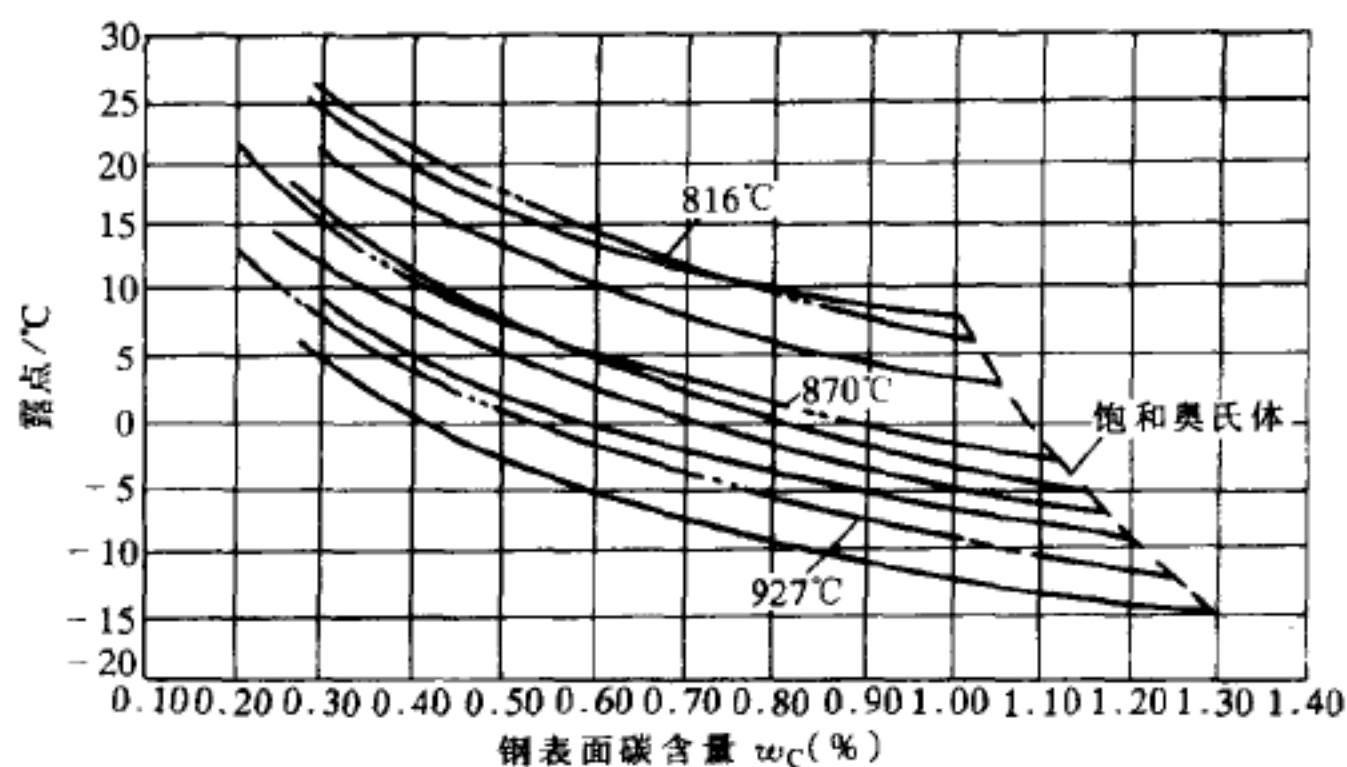


图 14-42 碳钢和吸热式气氛(用甲烷制备)的实测平衡曲线

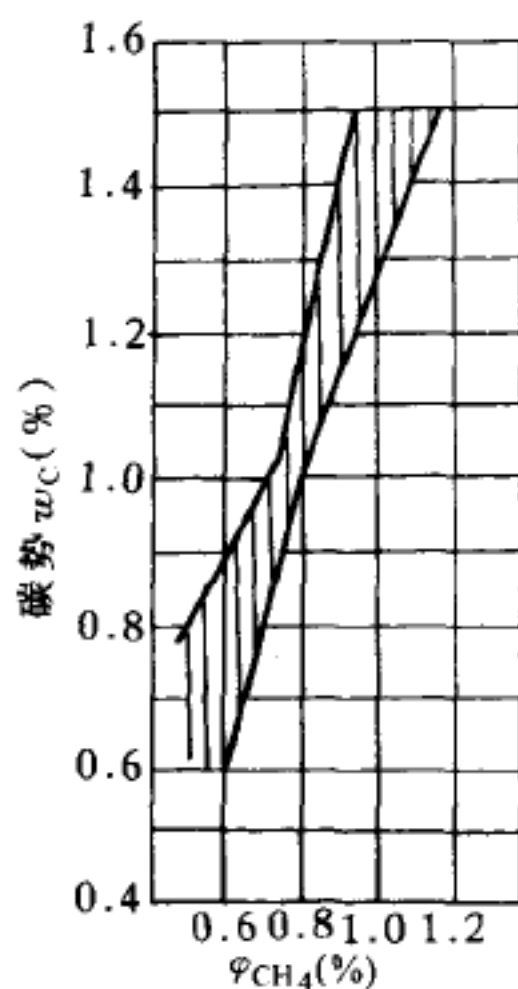


图 14-43 吸热式气氛中 CH_4 含量与碳势的关系

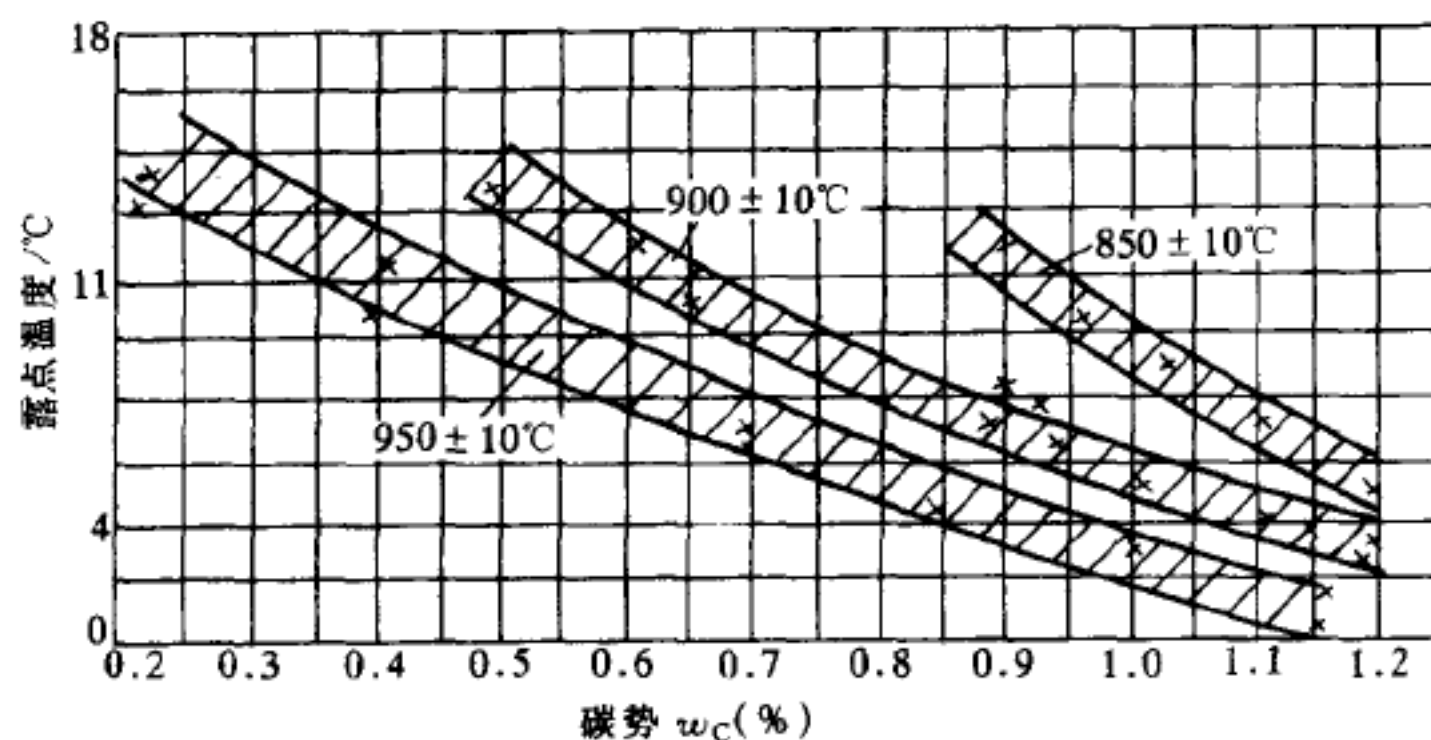


图 14-44 碳势-露点温度经验平衡曲线
(10 钢剥层, 甲醇 + 丙酮滴注液)

5. 氧探头法 (表 14-39 ~ 表 14-42)

表 14-39 丙烷制备吸热式气氛碳势对应的氧探头输出值

(单位: mV)

表面碳含量 w_c (%)	温 度 / $^{\circ}\text{C}$												
	800	825	850	875	900	925	950	975	1000	1025	1050	1075	1100
0.20	—	—	1032	1037	1041	1046	1051	1055	1060	1065	1069	1074	1079
0.25	—	—	1043	1048	1053	1058	1063	1068	1073	1078	1083	1088	1093
0.30	—	—	1053	1058	1063	1068	1074	1079	1084	1089	1094	1100	1104
0.35	—	—	1061	1066	1072	1077	1083	1088	1093	1098	1104	1109	1114
0.40	—	1063	1068	1074	1079	1085	1090	1096	1101	1107	1112	1118	1123
0.45	1063	1069	1075	1080	1086	1092	1097	1103	1109	1114	1120	1125	1131
0.50	1069	1073	1080	1086	1092	1098	1104	1109	1115	1121	1127	1132	1138
0.55	1074	1080	1086	1092	1098	1104	1109	1115	1121	1127	1133	1139	1145
0.60	1079	1085	1091	1097	1103	1109	1115	1121	1127	1133	1139	1145	1151
0.65	1083	1089	1095	1102	1108	1114	1120	1126	1132	1138	1144	1150	1156
0.70	1087	1093	1100	1106	1112	1118	1125	1131	1137	1143	1149	1156	1162
0.75	1091	1097	1104	1110	1117	1123	1129	1135	1142	1148	1154	1160	1167
0.80	1095	1101	1108	1114	1121	1127	1133	1140	1146	1153	1159	1165	1171
0.85	1098	1105	1112	1118	1125	1131	1138	1144	1150	1157	1163	1170	1176
0.90	—	1108	1115	1122	1128	1135	1141	1148	1155	1161	1168	1174	1180
0.95	—	1112	1119	1125	1132	1139	1145	1152	1158	1165	1172	1178	1185
1.00	—	1115	1122	1129	1135	1142	1149	1156	1162	1169	1176	1182	1189
1.05	—	—	1125	1132	1139	1146	1152	1159	1166	1173	1179	1186	1193
1.10	—	—	1128	1135	1142	1149	1156	1163	1169	1176	1183	1190	1197
1.15	—	—	—	—	1145	1152	1159	1166	1173	1180	1187	1193	1200
1.20	—	—	—	—	1148	1155	1162	1169	1176	1183	1190	1197	1204
1.25	—	—	—	—	—	—	1166	1173	1180	1187	1194	1201	1208
1.30	—	—	—	—	—	—	1169	1176	1183	1190	1197	1204	1211
1.35	—	—	—	—	—	—	1172	1179	1186	1193	1200	1207	1214
1.40	—	—	—	—	—	—	1175	1182	1189	1196	1204	1211	1218
1.45	—	—	—	—	—	—	1178	1185	1192	1199	1207	1204	1221

表 14-40 甲烷制备吸热式气氛碳势对应的氧探头输出值

(单位: mV)

表面碳含量 w_c (%)	温 度 / $^{\circ}\text{C}$												
	800	825	850	875	900	925	950	975	1000	1025	1050	1075	1100
0.20	—	—	1039	1044	1048	1053	1058	1063	1068	1073	1077	1082	1087
0.25	—	—	1050	1055	1060	1066	1071	1076	1081	1086	1091	1096	1101
0.30	—	—	1060	1065	1070	1076	1081	1086	1092	1097	1102	1107	1113
0.35	—	—	1068	1073	1079	1084	1090	1095	1101	1106	1112	1117	1123
0.40	—	1069	1075	1081	1086	1092	1098	1103	1109	1115	1120	1126	1131
0.45	1070	1075	1081	1087	1093	1099	1105	1110	1116	1122	1128	1133	1139
0.50	1075	1081	1087	1093	1099	1105	1111	1117	1123	1129	1135	1140	1146
0.55	1080	1086	1093	1099	1105	1111	1117	1123	1129	1135	1141	1147	1153
0.60	1085	1091	1097	1104	1110	1116	1122	1128	1135	1141	1147	1153	1159
0.65	1089	1096	1102	1108	1115	1121	1127	1134	1140	1146	1152	1158	1165
0.70	1094	1100	1106	1113	1119	1126	1132	1138	1145	1151	1157	1164	1170
0.75	1098	1104	1111	1117	1124	1130	1137	1143	1149	1156	1162	1169	1175
0.80	1101	1108	1115	1121	1128	1134	1141	1147	1154	1160	1167	1173	1180
0.85	1105	1112	1118	1125	1132	1138	1145	1152	1158	1165	1171	1178	1184
0.90	—	1115	1122	1129	1135	1142	1149	1156	1162	1169	1175	1182	1189
0.95	—	1118	1125	1132	1139	1146	1153	1159	1166	1173	1180	1186	1193
1.00	—	1122	1129	1136	1142	1149	1156	1163	1170	1177	1184	1190	1197
1.05	—	—	1132	1139	1146	1153	1160	1167	1174	1180	1187	1194	1201

(续)

表面碳含量 w_c (%)	温 度 /°C												
	800	825	850	875	900	925	950	975	1000	1025	1050	1075	1100
1.10	—	—	1135	1142	1149	1156	1163	1170	1177	1184	1191	1198	1205
1.15	—	—	—	—	1152	1159	1166	1174	1181	1188	1195	1202	1209
1.20	—	—	—	—	1155	1163	1170	1177	1184	1191	1198	1205	1212
1.25	—	—	—	—	—	—	1173	1180	1187	1194	1202	1209	1216
1.30	—	—	—	—	—	—	1176	1183	1191	1198	1205	1212	1219
1.35	—	—	—	—	—	—	1179	1186	1194	1201	1208	1215	1223
1.40	—	—	—	—	—	—	1182	1189	1197	1204	1211	1219	1226
1.45	—	—	—	—	—	—	1185	1192	1200	1207	1215	1222	1229

表 14-41 甲醇裂解气氛 ($\varphi_{CO} 31.5\%$) 碳势对应的氧探头输出值 (单位: mV)

表面碳含量 w_c (%)	温 度 /°C												
	800	825	850	875	900	925	950	975	1000	1025	1050	1075	1100
0.20	—	—	1017	1021	1026	1030	1034	1039	1043	1047	1052	1056	1060
0.25	—	—	1028	1033	1037	1042	1047	1051	1056	1061	1065	1070	1074
0.30	—	—	1038	1043	1047	1052	1057	1062	1067	1072	1076	1081	1086
0.35	—	—	1046	1051	1056	1061	1066	1071	1076	1081	1086	1091	1096
0.40	—	1048	1053	1058	1063	1069	1074	1079	1084	1089	1094	1099	1105
0.45	1049	1054	1059	1065	1070	1075	1081	1086	1091	1097	1102	1107	1112
0.50	1054	1060	1065	1071	1076	1082	1087	1093	1098	1103	1109	1114	1119
0.55	1059	1065	1071	1076	1082	1087	1093	1099	1104	1110	1115	1121	1126
0.60	1064	1070	1076	1081	1087	1093	1098	1104	1110	1115	1121	1127	1132
0.65	1068	1074	1080	1086	1092	1098	1103	1109	1115	1121	1126	1132	1138
0.70	1073	1079	1085	1090	1096	1102	1108	1114	1120	1126	1132	1137	1143
0.75	1077	1083	1089	1095	1101	1107	1113	1119	1125	1130	1136	1142	1148
0.80	1080	1086	1093	1099	1105	1111	1117	1123	1129	1135	1141	1147	1153
0.85	—	1094	1100	1106	1112	1119	1125	1131	1137	1143	1150	1156	1162
0.95	—	1097	1103	1110	1116	1122	1129	1135	1141	1147	1154	1160	1166
1.00	—	1100	1107	1113	1120	1126	1132	1139	1145	1151	1158	1164	1170
1.05	—	—	1110	1116	1123	1129	1136	1142	1149	1155	1161	1168	1174
1.10	—	—	1113	1120	1126	1133	1139	1146	1152	1159	1165	1172	1178
1.15	—	—	—	—	1129	1136	1143	1149	1156	1162	1169	1175	1182
1.20	—	—	—	—	1133	1139	1146	1152	1159	1166	1172	1179	1185
1.25	—	—	—	—	—	—	1149	1156	1162	1169	1176	1182	1189
1.30	—	—	—	—	—	—	1152	1159	1166	1172	1179	1186	1192
1.35	—	—	—	—	—	—	1155	1162	1169	1176	1182	1189	1196
1.40	—	—	—	—	—	—	1158	1165	1172	1179	1186	1192	1199

表 14-42 N_2-CH_3OH 气氛 ($\varphi_{CO} 17\%$) 碳势对应的氧探头输出值 (单位: mV)

表面碳含量 w_c (%)	温 度 /°C												
	800	825	850	875	900	925	950	975	1000	1025	1050	1075	1100
0.20	—	—	1047	1052	1057	1062	1067	1072	1077	1082	1087	1092	1097
0.25	—	—	1058	1063	1069	1074	1079	1085	1090	1095	1100	1105	1111
0.30	—	—	1068	1073	1079	1084	1090	1095	1101	1106	1111	1117	1122
0.35	—	—	1076	1081	1087	1093	1098	1104	1110	1115	1121	1127	1132
0.40	—	1077	1083	1089	1095	1100	1106	1112	1118	1124	1129	1135	1141
0.45	1077	1083	1089	1095	1101	1107	1113	1119	1125	1131	1137	1143	1149
0.50	1083	1089	1095	1101	1107	1114	1120	1126	1132	1138	1144	1150	1156
0.55	1088	1094	1100	1107	1113	1119	1125	1132	1138	1144	1150	1156	1163
0.60	1093	1099	1105	1112	1118	1125	1131	1137	1143	1150	1156	1162	1169

(续)

表面碳含量 w_c (%)	温 度 / $^{\circ}\text{C}$												
	800	825	850	875	900	925	950	975	1000	1025	1050	1075	1100
0.65	1097	1104	1110	1117	1123	1129	1136	1142	1149	1155	1162	1168	1174
0.70	1101	1108	1114	1121	1128	1134	1141	1147	1154	1160	1167	1173	1180
0.75	1105	1112	1119	1125	1132	1139	1145	1152	1158	1165	1172	1178	1185
0.80	1109	1116	1122	1129	1136	1143	1149	1156	1163	1169	1176	1183	1189
0.85	1112	1119	1126	1133	1140	1147	1154	1160	1176	1174	1181	1187	1194
0.90	—	1123	1130	1137	1144	1151	1157	1164	1171	1178	1185	1192	1198
0.95	—	1126	1133	1140	1147	1154	1161	1168	1175	1182	1189	1196	1203
1.00	—	1129	1137	1144	1151	1158	1165	1172	1179	1186	1193	1200	1207
1.05	—	—	1140	1147	1154	1161	1168	1175	1183	1190	1197	1204	1211
1.10	—	—	1143	1150	1157	1165	1172	1179	1186	1193	1200	1207	1215
1.15	—	—	—	—	1161	1168	1175	1182	1190	1197	1204	1211	1218
1.20	—	—	—	—	1164	1171	1178	1186	1193	1200	1207	1215	1222
1.25	—	—	—	—	—	—	1182	1189	1196	1204	1211	1218	1225
1.30	—	—	—	—	—	—	1185	1192	1199	1207	1214	1222	1229
1.35	—	—	—	—	—	—	1188	1195	1203	1210	1218	1225	1232
1.40	—	—	—	—	—	—	1191	1198	1206	1213	1221	1228	1236

6. 碳氮共渗时碳（氮）势控制（图 14-45 ~ 图 14-47）

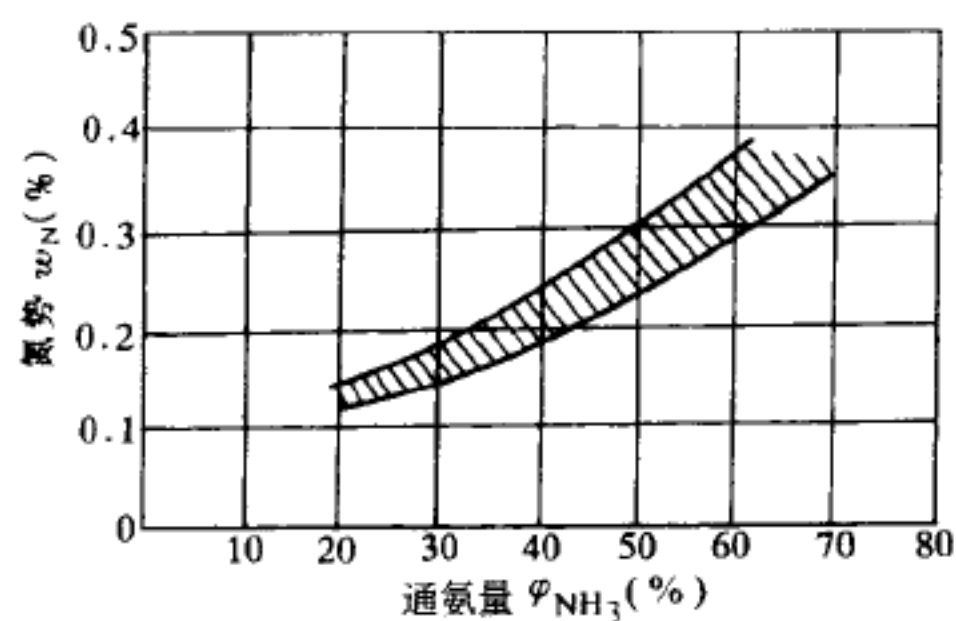
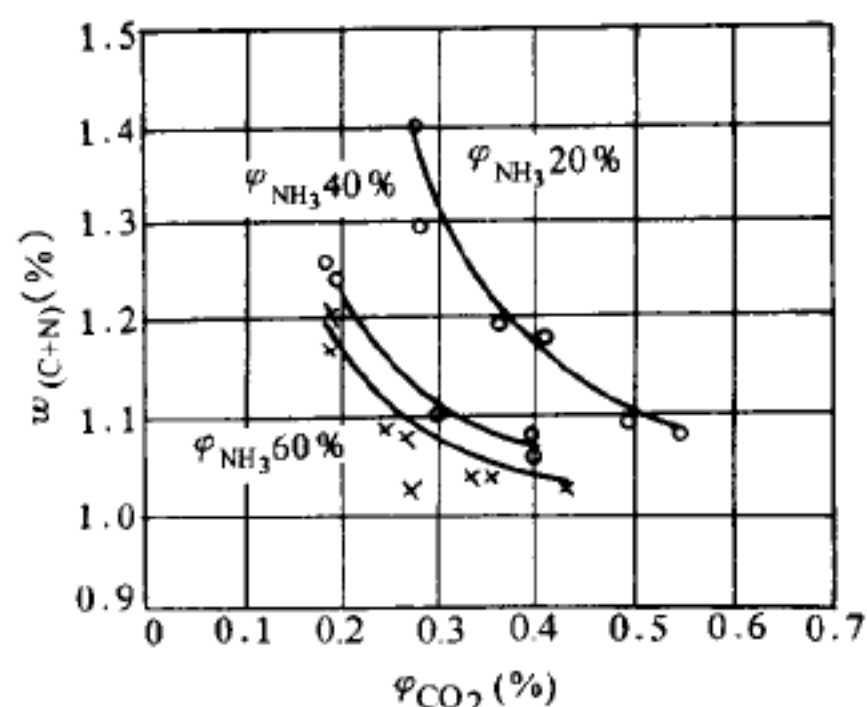
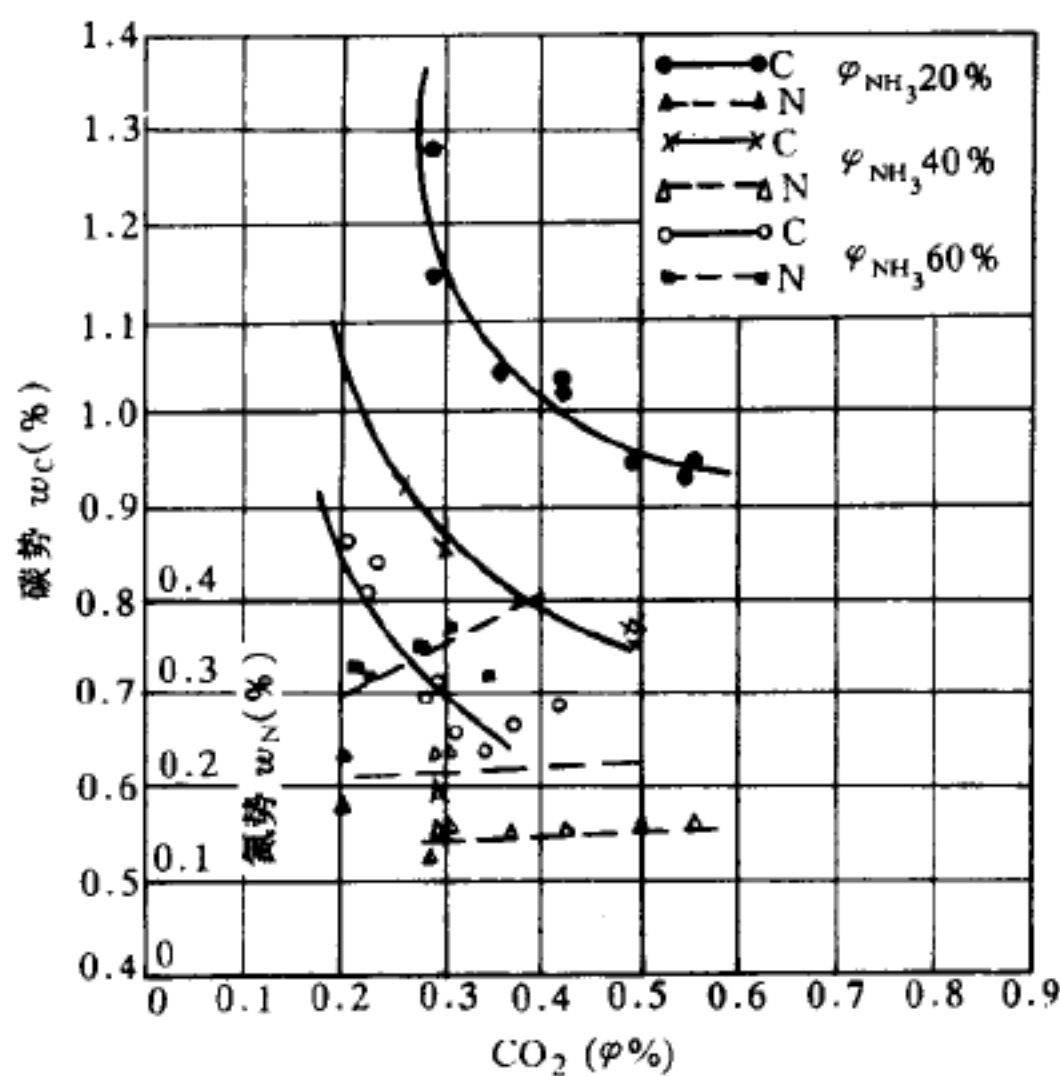


图 14-45 通氮量和炉气氮势曲线

图 14-47 固定通氮量时，炉气 $w_{(C+N)}$ %
和 w_{CO_2} % 关系曲线图 14-46 固定通氮量时，炉气 w_{CO_2} %
和碳势、氮势关系曲线

第 15 章 粉末冶金件的热处理

15.1 铁基粉末冶金件的热处理工艺及性能

1. 分类牌号及化学成分(表 15-1 ~ 表 15-3)

表 15-1 铁基粉末冶金结构材料的化学成分和力学性能

类别	钢种	牌号	密度 (不低于) /g· cm ⁻³	化学成分 (质量分数)(%)					力学性能			
				Fe	C _{化合}	Cu	Mo	其他	σ_b (不小于) /MPa	δ (%) (不小于)	冲击韧度 无缺口试样 (不小于) /J·cm ⁻²	表观硬度 不小于 HBW
第一类	烧结铁	FTG10—10	6.3	余量	≤0.1	—	—	≤1.5	100	3.0	5	40
		FTG10—15	6.8	余量	≤0.1	—	—	≤1.5	150	5.0	10	50
		FTG10—20	7.0	余量	≤0.1	—	—	≤1.5	200	7.0	20	60
第二类	烧结低碳钢	FTG30—10	6.2	余量	>0.1~0.4	—	—	≤1.5	100	1.5	5	50
		FTG30—15	6.5	余量	>0.1~0.4	—	—	≤1.5	150	2.0	10	60
		FTG30—20	6.8	余量	>0.1~0.4	—	—	≤1.5	200	3.0	15	70
第三类	烧结中碳钢	FTG60—15	6.2	余量	>0.4~0.7	—	—	≤1.5	150	1.0	5	60
		FTG60—20	6.5	余量	>0.4~0.7	—	—	≤1.5	200	1.5	5	70
		FTG60—25	6.8	余量	>0.4~0.7	—	—	≤1.5	250	2.0	10	80
第四类	烧结高碳钢	FTG90—20	6.2	余量	>0.7~1.0	—	—	≤1.5	200	0.5	3	70
		FTG90—25	6.5	余量	>0.7~1.0	—	—	≤1.5	250	0.5	5	80
		FTG90—30	6.8	余量	>0.7~1.0	—	—	≤1.5	300	1.0	5	90
第五类	烧结铜钢	FTG70Cu3—25	6.2	余量	0.5~0.8	2~4	—	≤1.5	250	0.5	3	90
		FTG70Cu3—35	6.5	余量	0.5~0.8	2~4	—	≤1.5	350	0.5	5	100
		FTG70Cu3—50	6.8	余量	0.5~0.8	2~4	—	≤1.5	500	0.5	5	110
第六类	烧结铜钼钢	FTG60Cu3Mo—40	6.5	余量	0.4~0.7	2~4	0.5~1.0	≤1.5	400	0.5	5	120
		FTG60Cu3Mo—55	6.8	余量	0.4~0.7	2~4	0.5~1.0	≤1.5	550	0.5	5	130

注：1. 化合碳量允许用金相法评定。

2. 材料牌号标记法为汉语拼音符号“FTG”表示类别属于粉末冶金铁基结构材料，用化学元素符号与数字分别表示化学成分以及含量与抗拉强度。

例如：

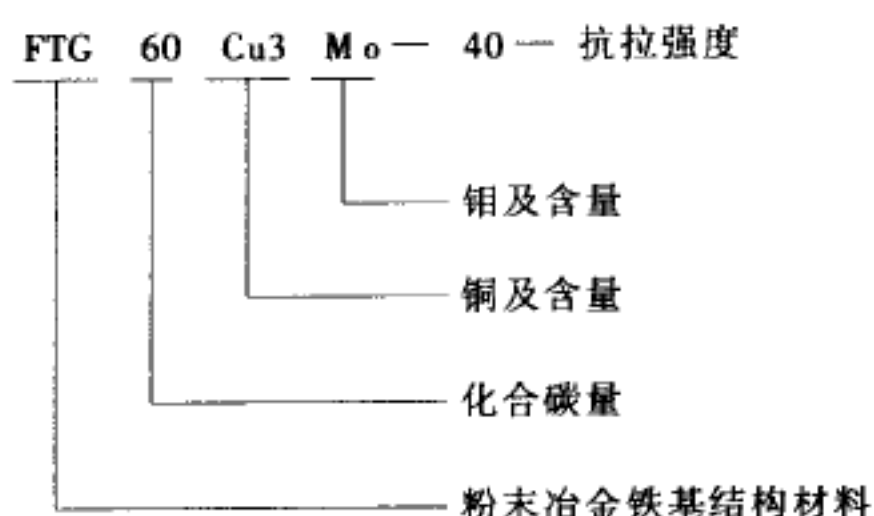


表 15-2 美国粉末冶金结构钢成分范围

类 别	MPIF 牌号	化学成分(质量分数)(%)			
		C	Ni	Cu	Fe
碳钢	F—0000	0 ~ 0.3			
	F—0005	0.3 ~ 0.6			
	F—0008	0.6 ~ 0.9			
铜钢	F—0200	0 ~ 0.3		1.5 ~ 3.9	93.8 ~ 98.5
	F—0205	0.3 ~ 0.6		1.5 ~ 3.9	93.5 ~ 98.2
	F—0208	0.6 ~ 0.9		1.5 ~ 3.9	93.2 ~ 97.9
镍钢	FN—0200	0 ~ 0.3	1.0 ~ 3.0	0 ~ 2.5	92.2 ~ 99.0
	FN—0205	0.3 ~ 0.6	1.0 ~ 3.0	0 ~ 2.5	91.9 ~ 98.7
	FN—0208	0.6 ~ 0.9	1.0 ~ 3.0	0 ~ 2.5	91.6 ~ 98.4
	FN—0405	0.3 ~ 0.6	3.0 ~ 5.5	0 ~ 2.0	89.9 ~ 96.7
	FN—0408	0.6 ~ 0.9	3.0 ~ 5.5	0 ~ 2.0	89.6 ~ 96.4
浸铜钢	FX—1005	0.3 ~ 0.6		8.0 ~ 14.9	82.5 ~ 91.7
	FX—1008	0.6 ~ 0.9		8.0 ~ 14.9	82.2 ~ 91.4
	FX—2005	0.3 ~ 0.6		15.0 ~ 25.0	72.4 ~ 84.7
	FX—2008	0.6 ~ 0.9		15.0 ~ 25.0	72.1 ~ 84.4
低合金钢				Mo	
	FL—4205	0.4 ~ 0.7	0.35 ~ 0.55	0.50 ~ 0.85	95.9 ~ 98.75
	FL—4405	0.4 ~ 0.7		0.70 ~ 1.00	96.3 ~ 98.9
	FL—4605	0.4 ~ 0.7	1.70 ~ 2.00	0.40 ~ 0.80	94.5 ~ 97.5
	FLN—4205	0.4 ~ 0.7	13.5 ~ 2.50 ^b	0.50 ~ 0.85	93.95 ~ 97.75

表 15-3 铁基粉末冶金结构材料的主要特点与应用举例

牌号	主要特点与应用举例
FTG10—10 FTG10—15 FTG10—20	塑性、韧性、焊接性与导磁性较好。适于制造受力极低,要求翻铆或焊接以及要求导磁的零件。例如:垫片、尺框、接铁、磁筒、极靴等
FTG30—10 FTG30—15 FTG30—20	塑性、韧性与焊接性较好,可进行渗碳淬火处理。适于制造受力较低,要求翻铆或焊接零件以及要求渗碳淬火零件。例如:端盖、滑块、毛纺、钢令、底座等
FTG60—15 FTG60—20 FTG60—25	强度较高,可进行热处理。适于制造轻负荷结构零件和要求热处理的零件。例如:隔套、接头、调节螺母、传动小齿轮、油泵转子等
FTG90—20 FTG90—25 FTG90—30	强度与硬度较高,耐磨性较好,可进行热处理。适于制造一般结构零件和耐磨零件。例如:推力垫、档套等
FTG70Cu3—25 FTG70Cu3—35 FTG70Cu3—50	强度与硬度高,耐磨性好,抗大气氧化性较好,可进行热处理。适于制造受力较高或耐磨的零件。例如:链轮、齿轮、推杆体、锁紧螺母、摆线转子等
FTG60Cu3Mo—40 FTG60Cu3Mo—55	强度与硬度高,耐磨性好,渗透性好,热稳定性好,高温回火脆性低。适于制造受力较高、要求耐磨或要求调质处理零件。例如:滚子、提火链块、螺旋螺母、活塞环、锁紧块、齿轮等

2. 淬火、回火工艺和性能(表 15-4 ~ 表 15-14, 图 15-1 ~ 图 15-3)

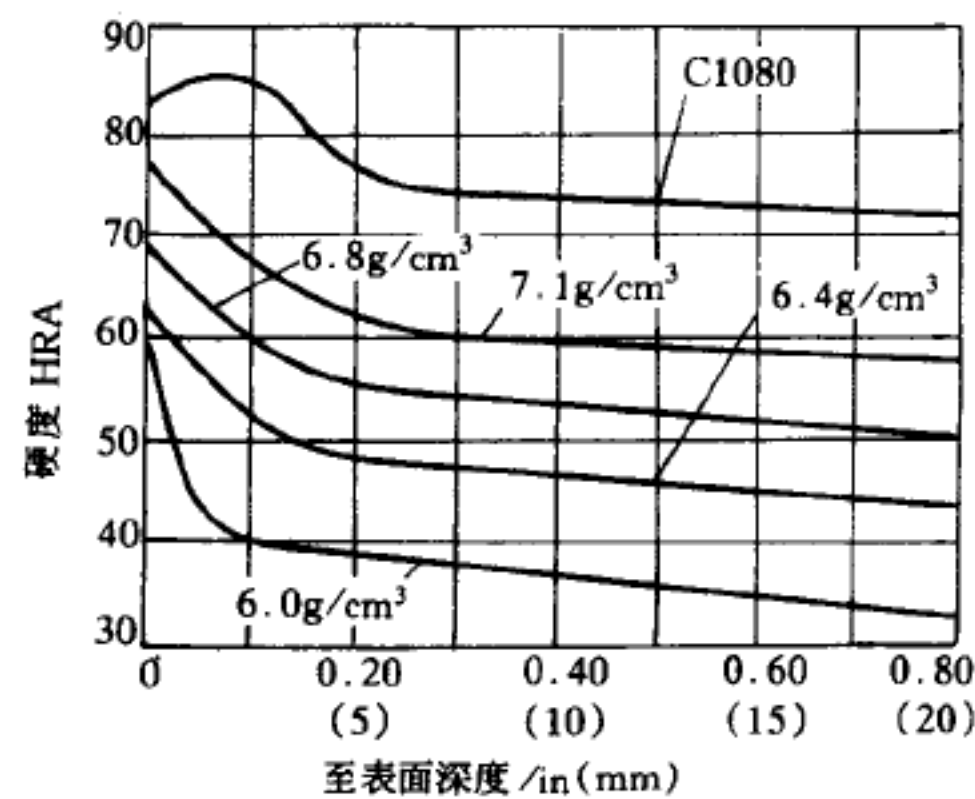


图 15-1 密度对粉末冶金钢淬透性的影响

表 15-4 铁基粉末冶金材料的淬火、回火工艺规范

密度 /g·cm ⁻³	淬火工艺				回火工艺	
	加热温度 /℃	保温时间 /min	转移时间 /s	冷却方式	温度/℃	时间/h
6.4 ~ 6.8	870 ~ 890	30 ~ 45	< 8	快速油冷	—	—
6.8 ~ 7.2	850 ~ 870	45 ~ 60	< 12		150 ~ 180	0.5 ~ 1
> 7.2	820 ~ 850	60 ~ 75	< 25		170 ~ 220	0.5 ~ 1

表 15-5 几种高碳粉末冶金材料经淬火、回火后的力学性能

材料	化学成分(质量分数)(%)					密度 /g·cm ⁻³	抗拉强度 /MPa	热处理前		热处理后	
	Fe	Cu	Ni	C	其他			基体硬度 HV 0.2	表面硬度 HRB	基体硬度 HV 0.2	表面硬度 HRA
Fe-C 系	余量	—	—	0.6 ~ 0.8	< 1	> 6.4	> 350	180 ~ 230	> 35	600 ~ 800	> 35
	余量	—	—	0.6 ~ 0.8	< 1	> 6.6	> 400	180 ~ 230	> 45	600 ~ 800	> 40
Fe-Cu-C 系	余量	3 ~ 5	—	0.6 ~ 0.8	< 1	> 6.4	> 450	200 ~ 240	> 50	600 ~ 800	> 45
	余量	3 ~ 5	—	0.6 ~ 0.8	< 1	> 6.6	> 500	200 ~ 240	> 60	600 ~ 800	> 52
	余量	3 ~ 5	—	0.6 ~ 0.8	< 1	> 6.8	> 550	200 ~ 240	> 65	600 ~ 800	> 55
Fe-Cu-Ni-C 系	余量	3 ~ 5 ^①		0.6 ~ 0.8	< 1	> 6.6	> 500	180 ~ 230	> 60	600 ~ 800	> 50
	余量	3 ~ 5 ^①		0.6 ~ 0.8	< 1	> 6.8	> 550	180 ~ 230	> 65	600 ~ 800	> 55

① 为 Cu、Ni 金属粉末成分的总和。

表 15-6 粉末冶金铜、镍、镍钼钢淬火、回火后的力学性能

材料 名称	牌号	化学成分(质量分数)(%)					密度/ g·cm ⁻³	抗拉强度 σ_b /MPa	横向断列 强度/MPa	表面硬度 HRC
		Fe	C	Cu	Ni	Mo				
铜钢	FC-0205-HT	97.5	0.5	2	—	—	6.8	786	1170	27
							7.0	869	1345	30
		96.5	0.5	3	—	—	6.8	765	1235	27
							7.0	883	1370	29
	FC-0208-HT	97.3	0.7	2	—	—	6.8	862	1360	35
							7.0	1030	1595	40

(续)

材料名称	牌号	化学成分(质量分数)(%)					密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	抗拉强度 σ_b/MPa	横向断列 强度 MPa	表观硬度 HRC
		Fe	C	Cu	Ni	Mo				
铜钢	FC-0208-HT	96.3	0.7	3	—	—	6.8	848	1435	34
							7.0	979	1745	38
镍钢	FN-0205-HT	97.4	0.6	—	2	—	6.8	792	1235	36
							7.0	993	1545	41
							7.2	1165	1795	44
镍钼钢	FL-4205-HT	98.4 5	0.5	—	0.45	0.60	6.8	765	1480	34
							7.0	889	1780	38
							7.1	979	1930	40
	FL-4605-HT	97.1 5	0.5	—	1.8	0.55	6.8	876	1505	33
							7.0	1035	1795	39
							7.1	1150	1950	42

注:热处理:850℃,15min,油淬。175℃,60min 回火。

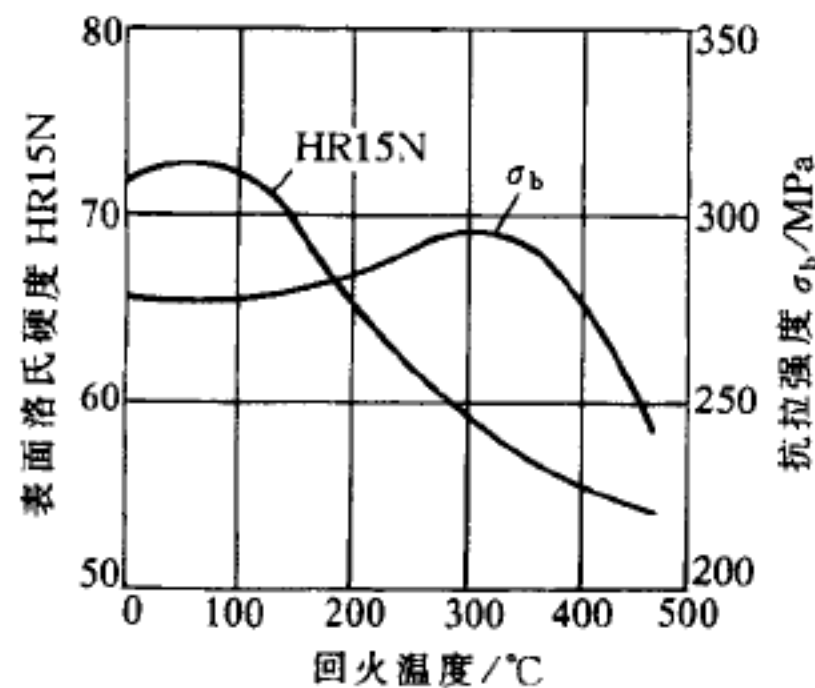


图 15-2 铁系烧结材料回火温度与性能之间的关系

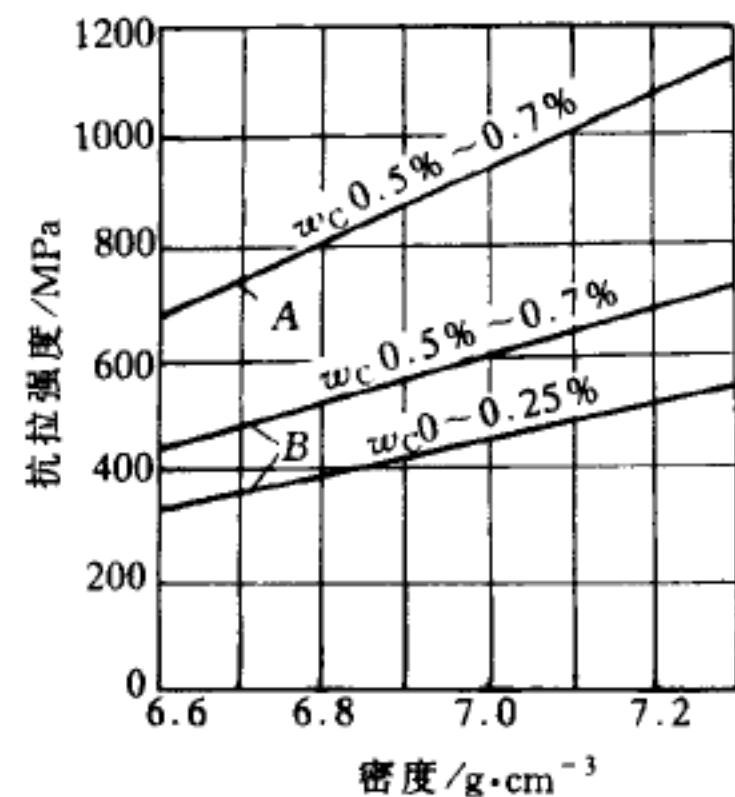


图 15-3 热处理和粉末冶金件的密度对拉伸强度的影响

A—热处理后的铁基烧结件

B—未经热处理的铁基烧结件

表 15-7 特殊粉末冶金材料制件的热处理效果

成分(质量分数)(%)								密度比	烧结后		热处理后	
Fe	C	Cu	Mn	Ni	Mo	Co	Si		抗拉强度 /MPa	硬度 HRB	抗拉强度 /MPa	硬度 HRC
其余	0.5	—	0.40	0.25	0.75	—	0.25	75	221	46	255	28
								80	298	58	400	38
								85	351	68	448	48
其余	—	—	0.40	0.35	0.75	—	0.25	74	125	76	180	27
								79	207	80	248	39
								84	234	91	389	45
其余	—	2.25	0.40	1.0	0.25	0.5	0.25	74	296	53	470	20
								79	496	62	586	30
								84	676	75	773	40

表 15-8 特殊粉末冶金件经不同热处理后的力学性能

碳含量 ^④ (%)	铜含量 ^④ (%)	压制压力 /MPa	热处理条件	屈服点/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率 (%)
0.2	30	110	f.c. ^①	552	635	3
	30	110	w.q.t. ^②	—	703	—
	25	276	f.c.	607	655	3
	25	138	w.q.t.	683	718	2
	20	164	f.c.	648	662	3
	20	164	w.q.t.	683	724	2
0.4	30	110	f.c.	552	600	3
	30	110	w.q.t.	669	718	3
	25	138	f.c.	565	614	3
	25	138	w.q.t.	586	718	3
	20	164	f.c.	599	607	3
	20	164	w.q.t.	711	738	3
	20	164	o.q.t. ^③	669	833	—
0.6	25	138	f.c.	311	531	4
	25	138	o.q.t.	455	572	3
	20	164	f.c.	504	669	4
	20	164	o.q.t.	524	669	—
	15	276	f.c.	539	662	4
	15	276	o.q.t.	531	641	2
	10	690	f.c.	545	559	4
	10	690	o.q.t.	517	620	2
	10	690	w.q.t.	752	793	—
1.1	25	138	f.c.	441	524	4
	25	138	o.q.t.	538	600	2
	20	164	f.c.	559	676	4
	20	164	o.q.t.	545	731	2
	15	276	f.c.	547	662	2
	15	276	o.q.t.	579	690	—

- ① f.c.—炉冷。
② w.q.t.—炉冷,再加热,水淬,回火。
③ o.q.t.—炉冷,再加热,油淬,回火。
④ 含量均指质量分数。

表 15-9 铜含量对铁-铜系粉末材料时效硬化的影响

铜含量 (质量分数) (%)	热处理工艺	抗拉强度 /MPa	
		热处理前	热处理后
1	加热到 925℃,油中淬火, 400~500℃时效 2~4h	340~390	540~580
2		380~440	620~670
3		420~480	710~730
4		460~500	720~740
5		440~520	730~770

表 15-10 热处理状态铁基粉末冶金结构材料的力学性能

类别	钢种	牌 号	密度 /g· cm ⁻³ 不低于	化学成分(质量分数)(%)					力学性能		
				Fe	C _{化合}	Cu	Mo	其他	抗拉强度 σ_b (不小于) /MPa	冲击 韧度 α_K (不小于) /J· cm ⁻²	硬度 HRA (不 低于)
第 2 类	烧结 低碳钢	FTG30—15(40R)	6.5	余量	> 0.1 ~ 0.4			≤ 2.0	(400)	3	50
		FTG30—20(45R)	6.8	余量	> 0.1 ~ 0.4			≤ 2.0	450	3	55
第 3 类	烧结 中碳钢	FTG60—20(45R)	6.5	余量	> 0.4 ~ 0.7			≤ 2.0	450	3	45
		FTG60—25(50R)	6.8	余量	> 0.4 ~ 0.7			≤ 2.0	500	5	50
第 4 类	烧结 高碳钢	FTG90—25(50R)	6.5	余量	> 0.7 ~ 1.0			≤ 2.0	500	3	50
		FTG90—30(55R)	6.8	余量	> 0.7 ~ 1.0			≤ 2.0	550	5	55
第 5 类	烧结 铜钢	FTG70Cu3—35(55R)	6.5	余量	> 0.5 ~ 0.8	2 ~ 4		≤ 2.0	550	3	55
		FTG70Cu3—50(65R)	6.8	余量	> 0.5 ~ 0.8	2 ~ 4		≤ 2.0	650	5	60
第 6 类	烧结 铜钼钢	FTG60Cu3Mo—40(55R)	6.5	余量	> 0.4 ~ 0.7	2 ~ 4	0.5 ~ 1.0	≤ 2.0	550	3	55
		FTG60Cu3Mo—55(70R)	6.8	余量	> 0.4 ~ 0.7	2 ~ 4	0.5 ~ 1.0	≤ 2.0	700	5	60

表 15-11 青铜浸渍铁的性能

铁骨架 的密度 (%)	理论最终 浸渍密度 (%)	相对密度 (%)	屈服点 ^① /MPa	极限抗拉 强 度 /MPa	伸长率 (%)(标距 25.4mm)	断面收缩率 (%)	硬度 HRB	铜含量 (%)
75	100	99.3	480	560	5	4.8	89	25.7
	95	95	500	520	3	1.6	85	22.5
	90	89.7	450	450	3	1.1	76	17.8
	85	84.7	400	400	2	0.8	66	12.75
80	100	99.3	520	580	4	4	93	21.65
	95	95.4	560	590	3	2.7	89	17.10
	90	90.3	620	560	3	2	83	13.55
	85	85.5	470	470	2	1.8	75	9.00
85	100	99.7	660	710	4	4.7	100	16.80
	95	97.5	620	690	3	2.9	97	13.65
	90	91.5	560	580	3	2.4	87	9.65
	85	85.4	160	170	3	4.9	41	2.30
90	100	99.8	590	710	5	6.5	98	12.10
	95	95.2	610	670	4	4.1	95	8.95
	90	91.5	200	210	2	—	76	3.05
	85	90.8	220	220	2	—	83	2.35

① 用分度仪测定。

表 15-12 铜溶液渗后的粉末冶金件的热处理效果

成分(质量分数)(%)			热处理工艺	密度 /g·cm ⁻³	σ_b /MPa	σ_s /MPa	硬度 HRB	伸长率 (%)	冲击吸收功 /J
Fe	Cu	C							
其余	25	—	900℃, 水冷	7.97	856	671	106	5.0	1.47
			500℃回火 2h						
			740℃回火 2h	8.01	402	289	70	25.0	20.2
其余	25	1.0	840℃, 水冷	7.93	1100	670	108	3.2	1.37
			840℃, 水冷; 315℃回火	7.94	1059	713	109	3.1	2.45
			650℃, 加热 18h	7.95	512	368	80	10.0	1.26
其余	15	1.0	790℃, 水冷	7.90	1292	680	116	1.5	0.69
			790℃, 水冷; 315℃回火	7.96	1254	722	112	3.0	1.07
			650℃, 加热 18h	7.89	505	376	90	11.0	9.32

表 15-13 汽车粉末冶金零件的性能和热处理举例

零件名称	材料	节省加工 工 时	性能		热处理及表面处理		
			耐磨性	耐热性	渗碳淬火、 回火	蒸汽处理	铜合金熔浸
计时齿轮	Fe, Fe-C	○	○		○		○
计时链轮	Fe, Fe-C	○	○		○		○
凸轮轴止推板	Fe-Cu	○	○		○		
阀座	特殊合金	○		○			
气阀摇臂球体	Fe-Cu-C		○		○		
气阀摇臂盖	Fe-C	○					○
阀簧抵座销	Fe-C-Ni	○			○		
燃料泵偏心轮	Fe	○	○		○		
燃料泵次摆线转子	Fe-Cu	○	○				
燃料泵摇杆	Fe-C	○			○		
燃料泵控制齿轮	Fe-Cu-Ni, Fe-Cu-C	○					
风扇皮带轮	Fe-Cu	○					
水泵叶轮衬垫	Fe-C	○					
热调节阀推杆	不锈钢	○		○			
V形皮带轮	Fe-Cu	○				○	
起动机减速齿轮	Fe-Cu, Fe-Cu-Ni, FeCu-C	○					
起动机链轮	Fe-Cu, Fe-Cu-C	○					
配油调速器离心锤	Fe-Cu-C	○				○	
轴承环	Fe-Cu-C	○					
同步器环	Fe-C	○	○				
同步离合器毂	Fe-C-Ni	○	○				
连杆球座	Fe-C-Mn		○				
球接头	Fe-C	○	○		○		
减振器销	Fe-C, Fe-Cu-C	○					
减振导向器	Fe-C	○				○	
推杆类零件	Fe, Fe-Cu, Fe-Cu-C, Cu-Sn	○					
离合器毂	Fe-Cu-C	○					○
球座盖	Fe-Cu-C	○					
转向器座零件	Fe-C-Ni	○			○		
车窗开闭调节器齿轮	Fe-Cu-C	○			○		
车门撞销	Fe-Cu-C	○	○		○		

注:“○”指可以采用的工序及可能提高的性能。

表 15-14 美国热处理态粉末冶金碳和低合金钢的力学性能

牌号		密度 /g·cm ⁻³	极限抗 拉强度 /MPa	伸长率 (标距 25.4mm) (%)	弹性模量 /GPa	泊松比	横向断裂 强度 /MPa	抗压 屈服强度 /MPa	冲击 吸收功 /J	表观硬度 HRC
F-0005	-50HT	6.6	410	<0.5	115	0.25	720	300	4	20
	-60HT	6.8	480	<0.5	130	0.27	830	360	5	22
	-70HT	7.0	550	<0.5	140	0.27	970	420	5	25
F-0008	-55HT	6.3	450	<0.5	115	0.25	690	290	4	22
	-65HT	6.0	520	<0.5	115	0.25	790	400	5	28
	-75HT	6.9	590	<0.5	135	0.27	900	520	6	32
	-85HT	7.1	660	<0.5	150	0.27	1000	590	7	35
FC-0205	-60HT	6.2	480	<0.5	110	0.25	660	390	3	19
	-70HT	6.5	550	<0.5	105	0.25	760	490	5	25
	-80HT	6.8	620	<0.5	130	0.27	830	590	6	31
	-90HT	7.0	690	<0.5	140	0.27	930	660	7	36
FC-0208	-50HT	6.1	450	<0.5	105	0.25	660	400	3	20
	-65HT	6.4	520	<0.5	120	0.27	760	500	5	27
	-80HT	6.8	620	<0.5	130	0.27	900	630	6	35
	-95HT	7.1	720	<0.5	150	0.27	1030	720	7	43
FN-0205	-80HT	6.6	620	<0.5	115	0.25	830	530	5	23
	-105HT	6.9	830	<0.5	135	0.27	1110	620	6	29
	-130HT	7.1	1000	<0.5	150	0.27	1310	680	8	33
	-155HT	7.2	1100	<0.5	155	0.28	1480	710	9	36
	-180HT	7.4	1280	<0.5	170	0.28	1720	770	13	40
FN-0208	-80HT	6.7	620	<0.5	120	0.25	830	680	5	26
	-105HT	6.9	830	<0.5	135	0.27	1030	850	6	31
	-130HT	7.0	1000	<0.5	140	0.27	1280	940	7	35
	-155HT	7.2	1170	<0.5	155	0.28	1520	1120	9	39
	-180HT	7.4	1340	<0.5	170	0.28	1720	1300	11	42
FN-0405	-80HT	6.5	590	<0.5	105	0.25	790	460	5	19
	-105HT	6.8	760	<0.5	130	0.27	1000	610	7	25
	-130HT	7.0	930	<0.5	140	0.27	1380	710	9	31
	-155HT	7.3	1100	<0.5	160	0.28	1690	850	13	37
	-180HT	7.4	1280	<0.5	170	0.28	1930	910	18	40
FL-4205	-80HT	6.60	620	<0.5	115	0.25	930	550	5	28
	-100HT	6.80	760	<0.5	130	0.26	1100	760	5	32
	-120HT	7.00	900	<0.5	140	0.26	1280	970	5	36
	-140HT	7.20	1030	<0.5	155	0.27	1480	1170	6	39
FL-4405	-100HT	6.70	760	<1.0	120	0.25	1100	—	7	24
	-125HT	6.90	930	<1.0	135	0.27	1380	—	9	29
	-150HT	7.10	1100	<1.0	150	0.27	1590	—	12	34
	-175HT	7.30	1280	<1.0	160	0.28	1930	—	15	38
FL-4605	-80HT	6.55	590	<0.5	110	0.24	900	630	5	24
	-100HT	6.75	760	<0.5	125	0.25	1140	790	6	29
	-120HT	6.95	900	<0.5	140	0.26	1340	960	8	34
	-140HT	7.20	1070	<0.5	155	0.27	1590	1170	9	39
FLN-4205	-80HT	6.60	620	<1.0	115	0.25	900	—	7	24
	-105HT	6.80	790	<1.0	130	0.27	1170	—	9	30
	-140HT	7.05	1030	<1.0	145	0.27	1590	—	12	36
	-180HT	7.30	1280	<1.0	160	0.28	2000	—	19	42

3. 化学热处理工艺和性能(图 15-4 ~ 图 15-10, 表 15-15 和表 15-16)

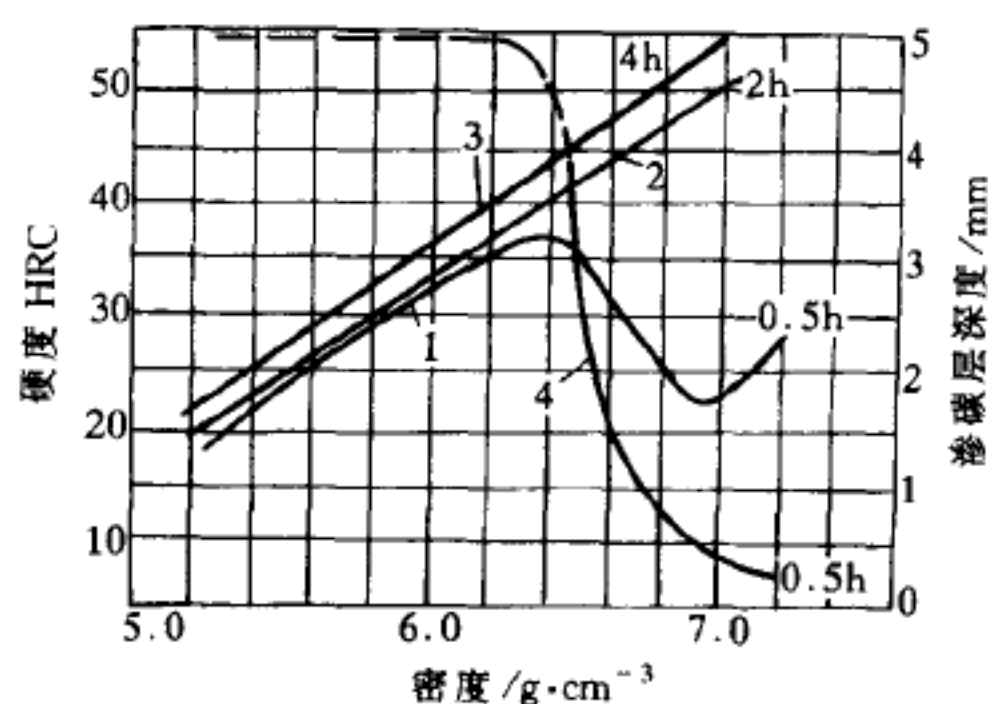


图 15-4 材料密度对渗碳淬火后硬度的影响
(试样尺寸 10mm × 20mm × 25mm)
1、2、3—硬度 4—渗碳层深度

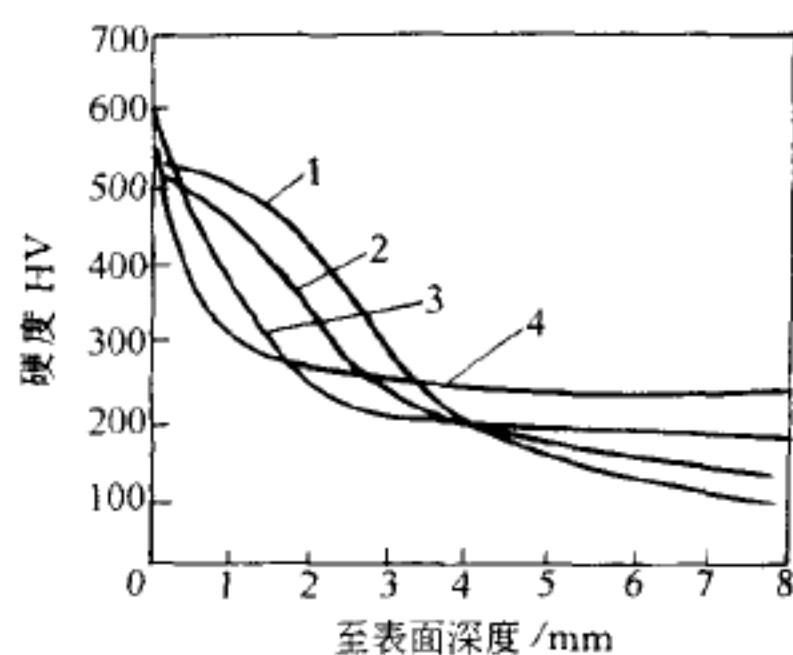


图 15-5 粉末冶金件密度与碳氮共渗层
硬度分布特性的关系
1—6.0g/cm³ 2—6.4g/cm³
3—6.8g/cm³ 4—T8A 钢

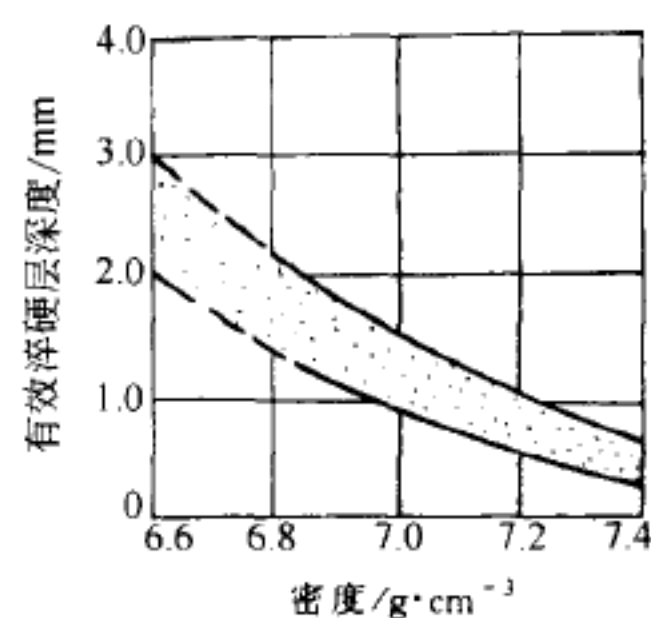


图 15-7 渗碳淬火后的有效
淬硬层深度与材料密度的关系
(900℃ 渗碳 1.5 ~ 2h,
850℃ 淬火 200℃ 回火)

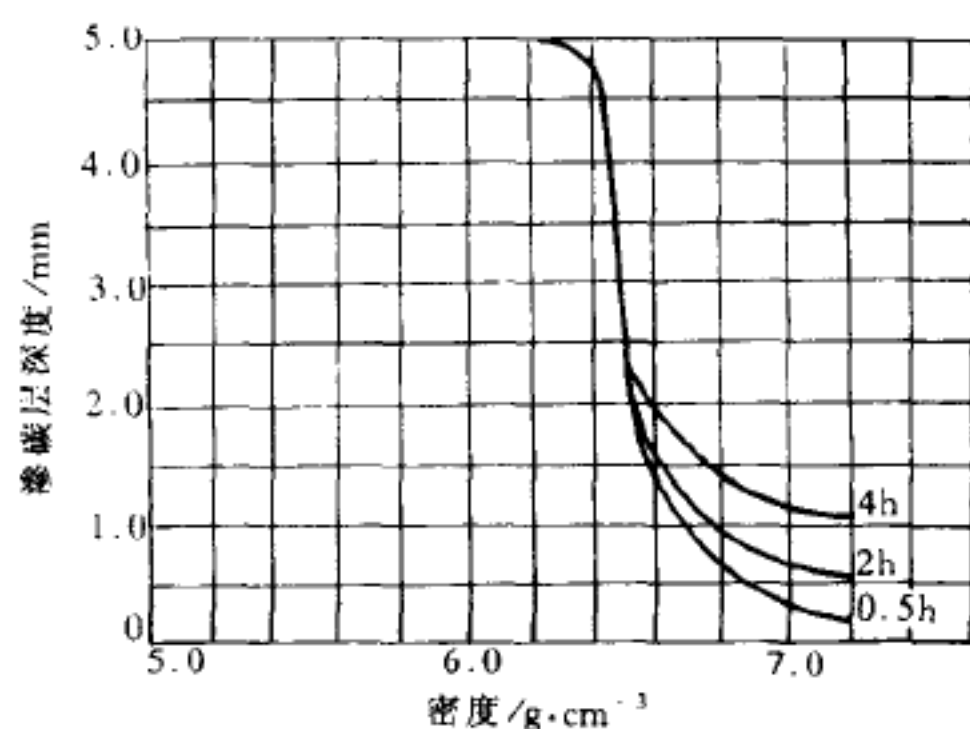


图 15-6 材料密度和渗碳时间
对渗碳层深度的影响
[910℃ 在 0.154mm(100 目)碳粉中渗碳]

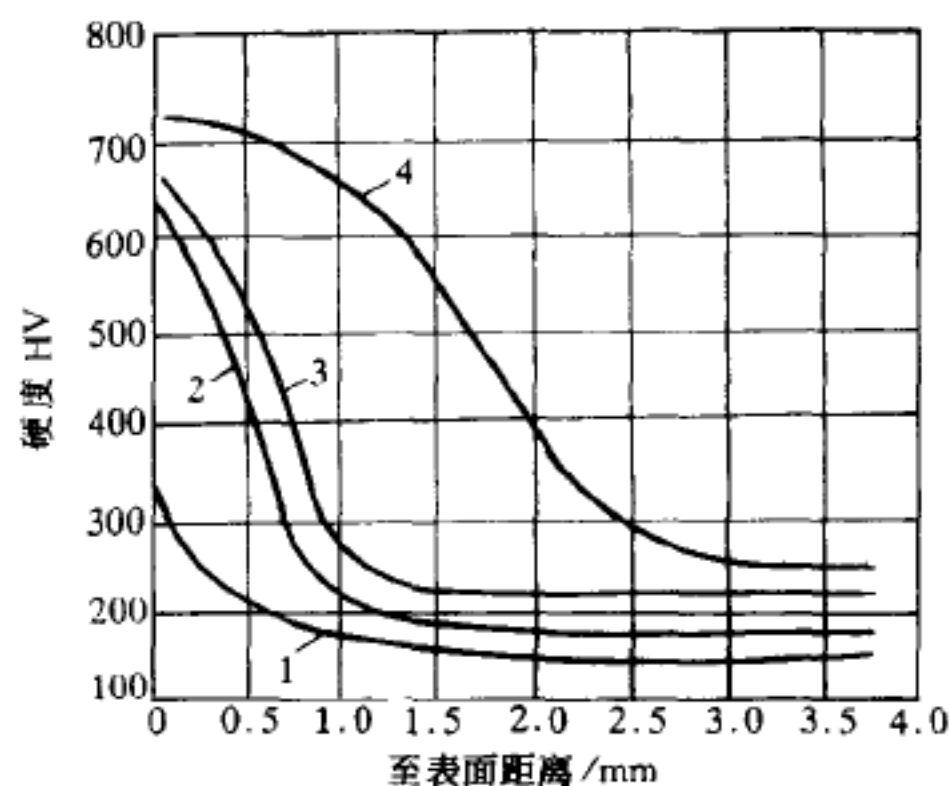


图 15-8 渗碳层淬硬性与铜、镍的影响
(烧结密度 $6.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 气体渗碳 850℃, 2h)
1—Fe + $w_C 0.5\%$ 2—Fe + $w_{Cu} 2.5\%$ + $w_C 0.5\%$
3—Fe + $w_{Cu} 2.5\%$ + $w_{Ni} 1\%$ + $w_C 0.5\%$
4—Fe + $w_{Cu} 2.5\%$ + $w_{Ni} 2.5\%$ + $w_C 0.5\%$

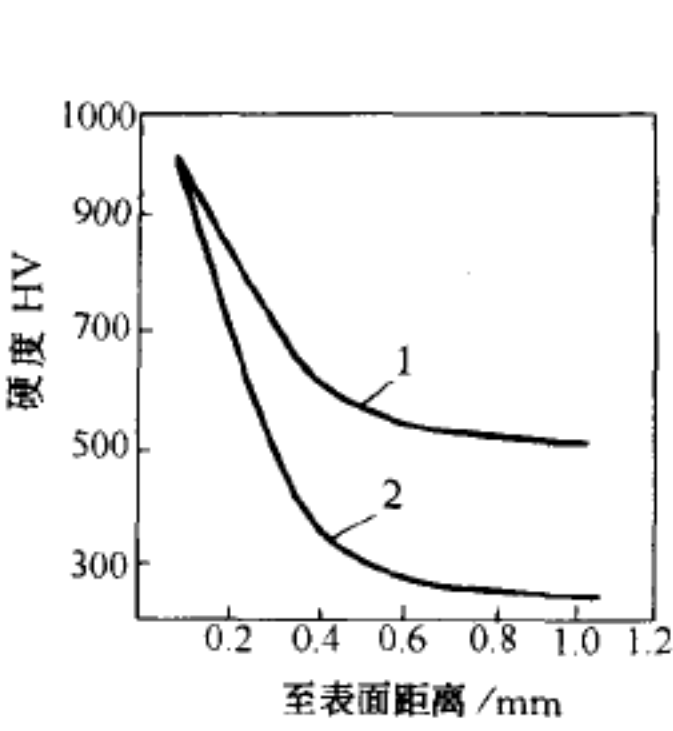


图 15-9 烧结 Fe-Cu-C 材料渗氮层硬度分布曲线
1—7.1g/cm³, 500℃, 1h
2—7.3g/cm³, 500℃, 1h

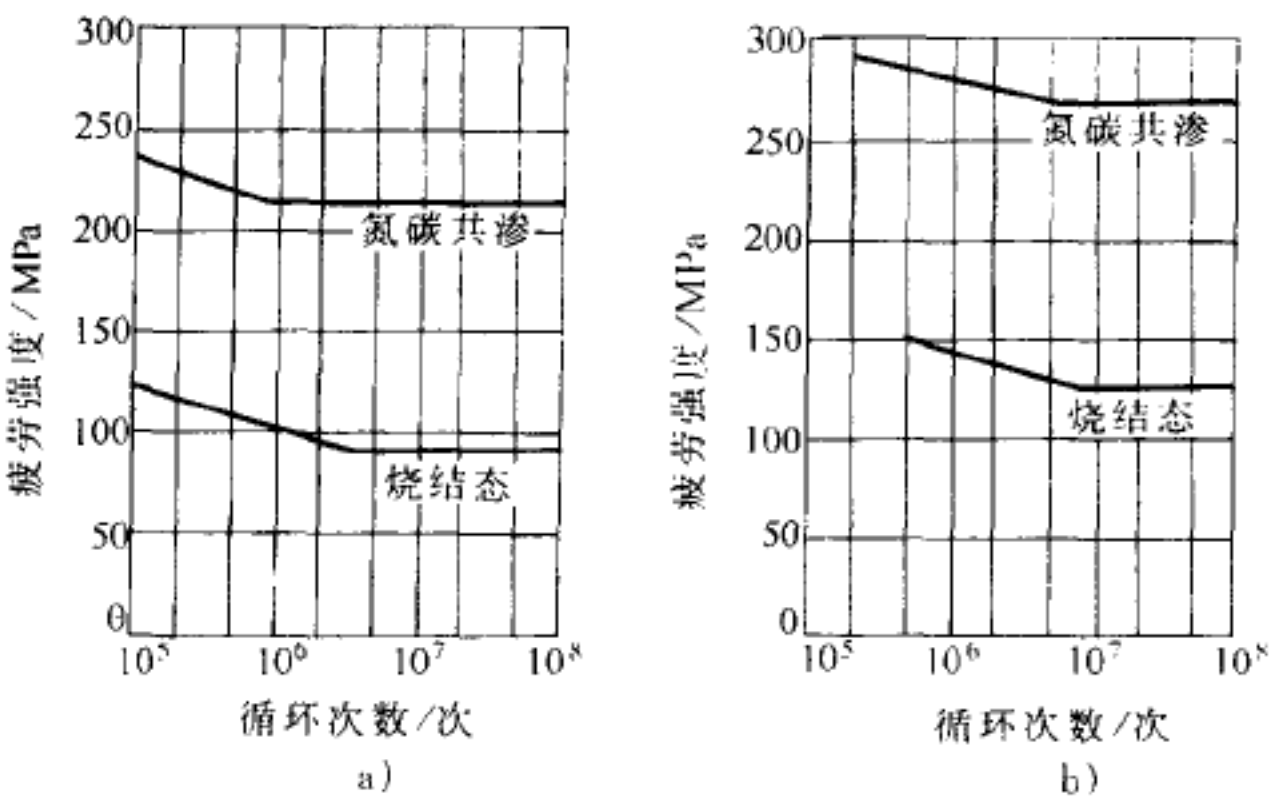


图 15-10 氮碳共渗对粉末冶金材料缺口疲劳强度的影响
a) 碳钢 (F-0000)
b) 铜钢 (FC-0205)

表 15-15 各种低碳粉末冶金件渗碳淬火后的硬度

材 料	成分(质量分数)(%)					硬度 HV 0.2	
	Fe	Cu	Ni	C	其他	热处理前	热处理后
Fe 系	余量	—	—	—	< 1	80 ~ 120	600 ~ 800
Fe-Cu 系	余量	2 ~ 3	—	—	< 1	150 ~ 200	600 ~ 800
Fe-C 系	余量	—	—	0.2 ~ 0.4	< 1	150 ~ 200	600 ~ 800
Fe-Cu-C 系	余量	3 ~ 5	—	0.2 ~ 0.4	< 1	150 ~ 200	600 ~ 800
Fe-Cu-Ni-C 系	余量	3 ~ 5 ^①		0.2 ~ 0.4	< 1	150 ~ 200	600 ~ 800

① 为 Cu、Ni 金属粉末成分的总和。

表 15-16 铁、铁-铜系粉末冶金件渗碳淬火后的典型力学性能

材 料	密度 /g·cm ⁻³	硬化层深度 /mm	硬 度		冲击吸收功 /J	抗拉强度 /MPa
			HRC	HR30N		
Fe 系	7.0	0.27	—	45	4.31	617
		0.35	—	48	4.08	638
		0.70	15	55	3.81	840
Fe 系	7.48	0.35	—	43	6.20	824
		0.50	—	54	5.52	912
		0.80	22	59	4.56	952
Fe-Cu 系	7.28	0.40	—	65	4.19	1080
		0.60	—	70	3.24	853
		0.90	45	70	3.43	952

4. 蒸汽处理工艺和性能(表 15-17,图 15-11 ~ 图 15-14)

表 15-17 蒸汽处理对粉末冶金钢密度及硬度的影响

材 料	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$		表观硬度	
	烧结态	蒸汽处理	烧结态 HRB	蒸汽处理 HRB
F—0000—N	5.8	6.2	7HRF	75
F—0000—P	6.2	6.4	32HRF	61
F—0000—R	6.5	6.6	45HRF	51
F—0008—M	5.8	6.1	44	100
F—0008—P	6.2	6.4	58	98
F—0008—R	6.5	6.6	60	97
FC—0700—N	5.7	6.0	14	73
FC—0700—P	6.35	6.5	49	78
FC—0700—R	6.6	6.6	58	77
FC—0708—N	5.7	6.0	52	97
FC—0708—P	6.3	6.4	72	94
FC—0708—R	6.6	6.6	79	93

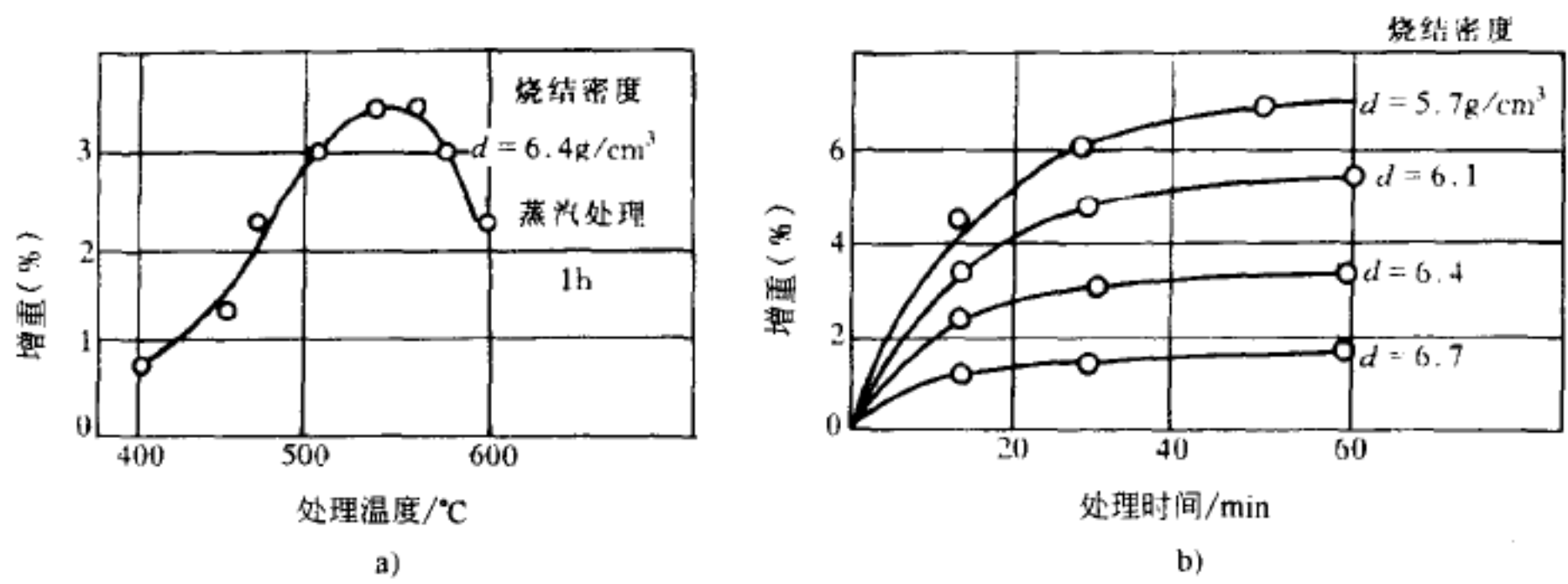


图 15-11 蒸汽处理温度和时间对氧化膜生长的影响
a) 处理温度的影响 b) 处理时间的影响

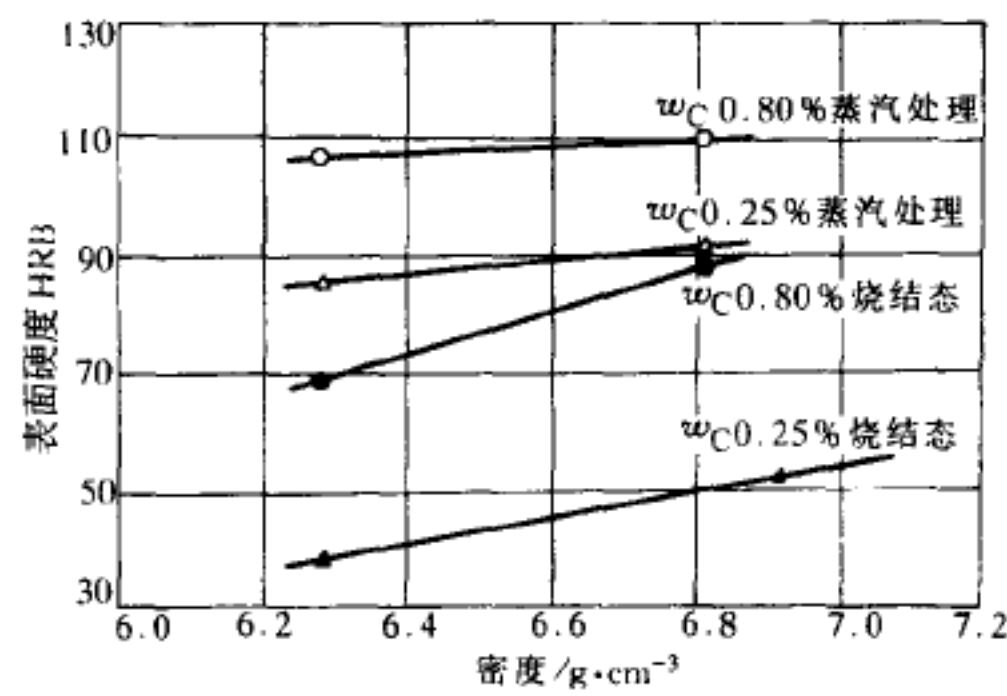


图 15-12 蒸汽处理对粉末冶金碳钢硬度的影响

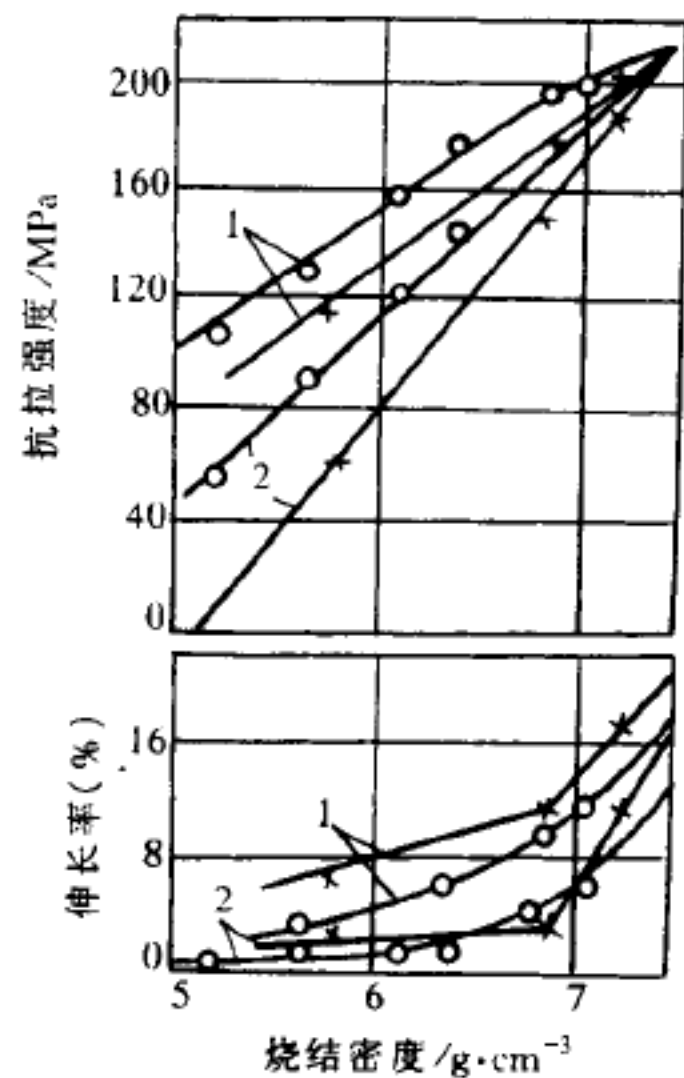


图 15-13 蒸汽处理对粉末冶金件力学性能的影响(550℃,1h,蒸汽压 0.1MPa)
1—烧结体 2—经蒸汽处理
—○—还原铁粉 —×—电解铁粉

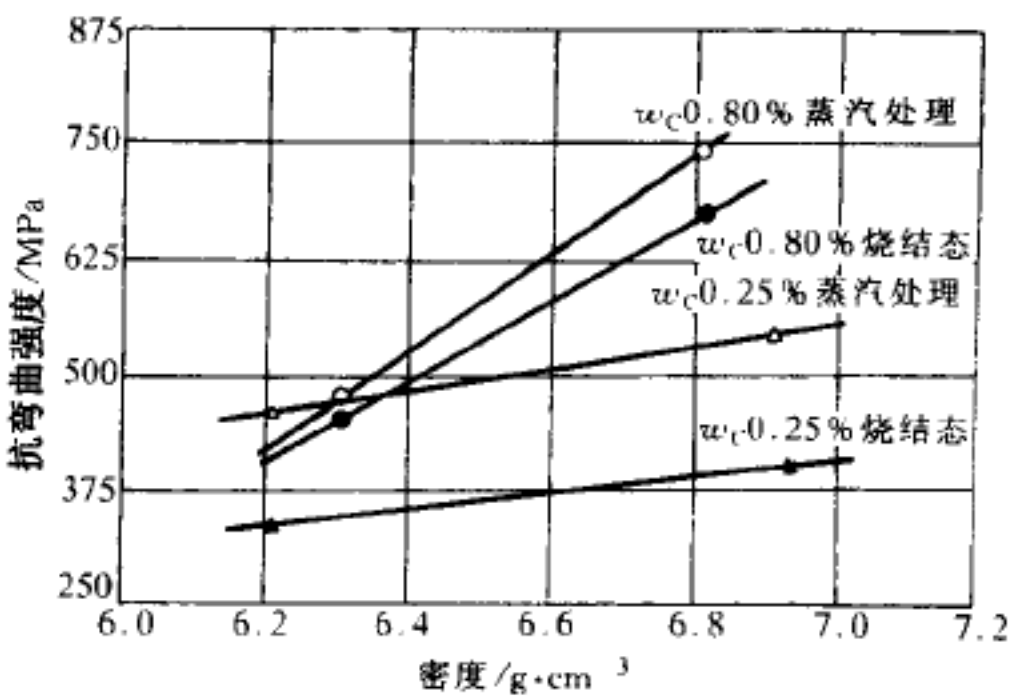


图 15-14 蒸汽处理对粉末冶金碳钢弯曲强度的影响

15.2 钢结硬质合金的热处理工艺及性能

1. 化学成分及物理性能(表 15-18 ~ 表 15-22)

表 15-18 钢结硬质合金的类型、牌号、钢基体种类和化学成分

钢结硬质合金类型	牌号或代号	钢基体种类	化学成分(质量分数)(%)								
			TiC	WC	C	Cr	Mo	V	Ni	其他	Fe
合金工具钢 钢结硬质合金	GT35	高碳中铬钼合金钢	35	—	0.5	2.0	2.0	—	—	—	余量
	R5	高碳高铬钼合金钢	30~40	—	0.6~0.8	6.0~13.0	0.5~3.0	0.1~0.5	—	—	余量
	TLMW50	高碳铬钼合金钢	—	50	0.5	1.25	1.25	—	—	—	余量
	GW50	高碳低铬钼合金钢	—	50	<0.6	0.55	0.15	—	—	—	余量
	GJW50	中碳低铬钼合金钢	—	50	0.25	0.5	0.25	—	—	—	余量
不锈钢钢结硬质合金	R8	半铁素体不锈钢	30~40	—	<0.15	12~20	0~4	—	—	Ti:0~1.0	余量
	ST60	奥氏体不锈钢	50~70	—	—	5~9	—	—	3~7	La ₂ O ₃ : 0~0.5	余量
高速钢钢结硬质合金	D1	高速钢	25~40	—	0.4~0.8	2~4	—	0.5~1.0	—	W:10~15	余量
	T1	高速钢	25~40	—	0.6~0.9	2~5	2~5	1.0~2.0	—	W:3~6	余量
高锰钢钢结硬质合金	TM60	奥氏体高锰钢	30~50	—	0.8~1.4	—	0.6~2	—	0.6~2	Mn:9~12	余量
	TM52	奥氏体高锰钢	40~60	—	0.8~1.2	—	0.6~2	—	0.6~2	Mn:8~10	余量

表 15-19 常用钢结硬质合金的热膨胀系数

温度范围/℃	热膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$						
	GT35	R5	TLMW50	GW50	ST60	R8	T1
20 ~ 100	6.09	8.34	6.72	8.90	8.6	6.63	4.37
20 ~ 200	8.43	9.16	8.06	9.10	10.1	7.58	8.54
20 ~ 300	10.04	9.95	8.65	9.34	11.8	8.68	9.68
20 ~ 400	10.37	10.53	9.07	9.40	11.2	9.81	10.38
20 ~ 500	11.22	10.71	9.62	9.52	11.5	9.98	10.86
20 ~ 600	11.51	10.82	10.15	9.70	11.6	10.40	11.25
20 ~ 700	11.83	11.13	10.60	9.86	11.8	10.60	11.48
20 ~ 800	—	—	—	—	11.7	10.80	11.10
20 ~ 900	—	—	—	—	11.9	11.00	11.14

表 15-20 典型合金工具钢钢结合金的物理力学性能

牌号或代号	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	硬度 HRC		抗弯 强度 ^① /MPa	冲击韧 度 ^① / $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$	弹性模量 /GPa		比电阻 / $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}^{-1}$		摩擦系数 ^②		矫顽力 ^① / $\times 80\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
		退火态	淬火态			退火态	淬火态	退火态	淬火态	自配对	与 T10 配对	
GT35	6.40 ~ 6.60	39 ~ 46	68 ~ 72	1400 ~ 1800	5.89	30600	29800	0.812	0.637	0.030	0.109	68
R5	6.35 ~ 6.45	44 ~ 48	72 ~ 73	1200 ~ 1400	2.94	32100	31300	0.784	0.269	0.044	0.104	90
TLMW50	10.21 ~ 10.37	35 ~ 40	66 ~ 68	2000	7.85	—	—	—	—	—	—	—
GW50	10.20 ~ 10.40	38 ~ 43	69 ~ 70	1700 ~ 2300	11.8	—	—	—	—	—	—	—
GJW50	10.20 ~ 10.30	35 ~ 38	65 ~ 66	1520 ~ 2200	6.97	—	—	—	—	—	—	—

① 系淬火态性能。

② 采用国产 MM200 型摩擦磨损试验机,滑动摩擦,以 L—AN32(20 号机油)润滑。

表 15-21 美国的钢结硬质合金牌号与成分

牌号 Ferro—TiC	化学成分(质量分数)(%)												
	C	TiC	WC	Cr	Ni	Mo	W	Co	Cu	Ti	Al	V	Fe
C	0.40	33	—	2.0	—	2.0	—	—	—	—	—	—	余量
S—45	—	39	—	11.0	7.3	—	—	—	—	—	—	—	余量
S—55	—	52	—	8.6	5.7	—	—	—	—	—	—	—	余量
J	0.47	16.5	38.5	2.75	—	—	6.6	—	—	—	—	1.1	余量
CM	0.56	34	—	6.6	—	2.0	—	—	—	—	—	—	余量
CS—40	0.43	34	—	11.55	—	0.33	—	—	—	—	—	—	余量
M6	—	33	—	—	12	3.2	—	5.7	—	0.7	—	—	余量
M6—A	—	37.5	—	—	11.2	2.9	—	5.3	—	0.6	—	—	余量
M6—B	—	42.5	—	—	10.5	2.5	—	5.0	—	0.5	—	—	余量
MS—5	—	33.6	—	9.4	4.0	2.7	—	3.4	—	1.0	—	—	余量
HT—6	—	33	—	12	47.6	—	—	—	—	1.34	0.67	—	5.4
DN—1	—	33	—	—	余量	—	—	—	—	—	3.0	—	—
CN—5	—	—	60	—	12	—	—	—	余量	—	—	—	—
SK	0.3	25	—	3.75	0.375	3	—	—	—	—	—	—	余量

表 15-22 美国钢结硬质合金的物理性能

牌号 Ferro—TiC	热膨胀系数 $/\times 10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$		热振循 环数 ^①	比电阻 $/\Omega\cdot\text{mm}^2\cdot\text{m}^{-1}$		磁性 $/\times 10^{-4}\text{T}$		矫顽力 $1\times 80\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$	热处理时 尺寸变化 (%)	备 注
				退火态	硬化态	磁饱和	剩磁			
CM	20~90℃ 6.23 20~535℃ 8.35		1	0.57	0.61	5150	3230	61	± 0.025	良好的抗回火性。 用于耐磨零件或重成 形或中温($\leq 600^{\circ}\text{C}$)工 作的工模具
C	20~90℃ 6.39 20~200℃ 7.83		2	0.34	0.53	9650	3475	66	+0.04	用于工具、模具和耐 磨零件,在退火态下具 有优异的振荡阻尼值
SK	20~90℃ 8.82 20~535℃ 9.45		15	0.36	0.57	—	—	64	± 0.03	有良好的抗热振与 抗冲击性能,适用于热 加工用途,冷锻模和锤 头
LT	20~90℃ 7.56 20~650℃ 8.64		33	—	—	—	—	—	-0.02	比 SK 还好的抗热振 和高温硬度,适用于中 温热作用用途
CRHS	20~90℃ 9.09 20~650℃ 11.34		35	—	—	—	—	—	+0.15	最好的抗热振性,适 于苛刻的热作用用途
CS—40	20~90℃ 5.55 20~315℃ 6.80		1	0.74	0.80	2470	1620	60	+0.043	具有 400 # 不锈钢的 高硬度和抗腐蚀性
M—6	20~90℃ 6.05 20~425℃ 7.81		12	0.89	0.78	7120	3760	19	-0.03	热处理简单,无变 形,抗强卤化物腐蚀
MS-5	20~90℃ 7.74 20~480℃ 8.64		8	1.14	1.03	4700	2010	24	± 0.020	良好的抗腐蚀性 与尺寸稳定性,比 M—6 更抗弱酸
HT—2	20~90℃ 9.54 20~535℃ 10.71		12	—	—	稍具磁性			± 0.01	良好的抗腐蚀性、抗 氧化性,具有优异的尺 寸稳定性,抗应力腐蚀 与抗热振
HT—6	20~90℃ 7.61 20~535℃ 11.03		1	1.23	1.20	非磁性			-0.042	优异的抗氧化性与抗 腐蚀性,良好的热硬性 与高温硬度

2. 热处理工艺和性能(表 15-23 ~ 表 15-34,图 15-15 ~ 图 15-20)

表 15-23 常用钢结硬质合金的临界点

牌号或代号	临界点 $/^{\circ}\text{C}$						备 注
	Ac_1	Ac_3	Ac_{cm}	Ar_{cm}	Ar_3	Ar_1	
GT35	740	770	—	—	未测	未测	过共析钢基体
R5	780	—	820	不明显	700	—	
T1	780	—	800	不明显	730	—	
TLMW50	761	788	—	—	730	690	
GW50	745	790	—	—	770	710	
GJW50	760	810	—	—	763	710	

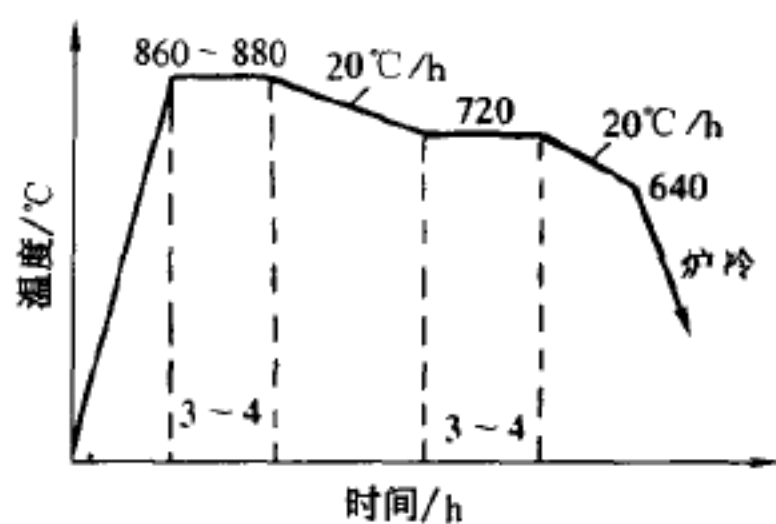


图 15-15 GT35 合金的退火工艺规范

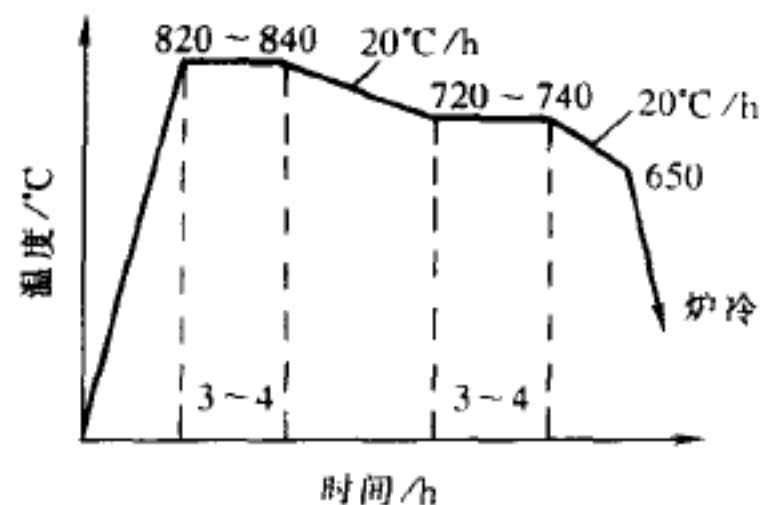


图 15-16 R5、T1 合金的退火工艺规范

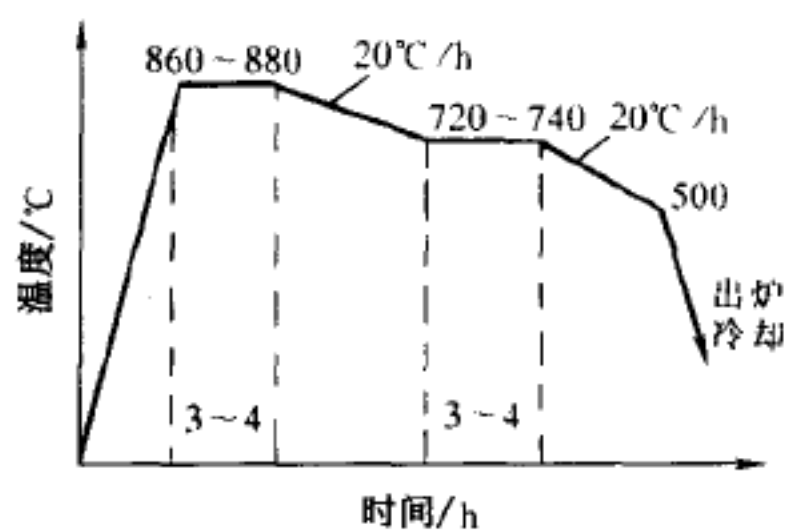


图 15-17 TLMW50 合金的退火工艺规范

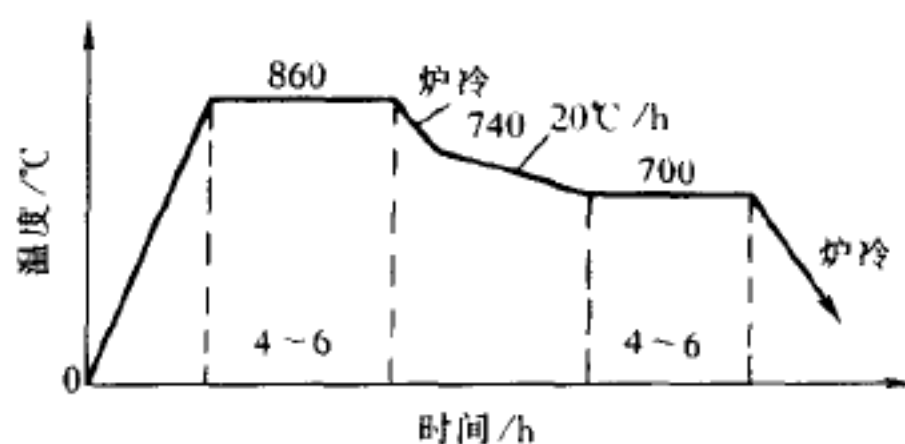


图 15-18 GW50 合金的退火工艺规范

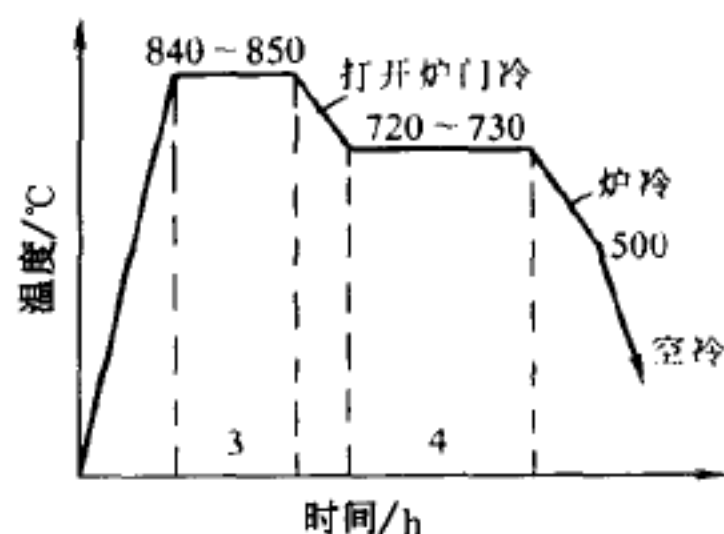


图 15-19 GJW50 合金的退火工艺规范

表 15-24 几种典型钢结合金的淬火工艺制度

牌号或代号	淬火设备	淬火工艺条件					淬火硬度 HRC
		预热温度 /°C	预热时间 /min	加热温度 /°C	保温时间 ^① 按速率计 /min·mm ⁻¹	冷却介质	
GT35	盐浴炉	800~850	30	960~980	0.5	油	69~72
R5	盐浴炉	800	30	1000~1050	0.6	油或空气	70~73
R8	盐浴炉	800	30	1150~1200	0.5	油或空气	62~66
T1	高温盐浴炉	800	30	1240	0.3~0.4	600°C盐浴空冷	73
D1	高温盐浴炉	800	30	1220~1240	0.6~0.7	560°C盐浴油冷	72~74
TLMW50	盐浴炉	820~850	30	1050	0.5~0.7	油	68
GW50	箱式炉	800~850	30	1050~1100	2~3	油	68~72
GJW50	盐浴炉	800~820	30	1020	0.5~1.0	油	70

① 保温时间 = 工件有效尺寸 × 热透速率, min。

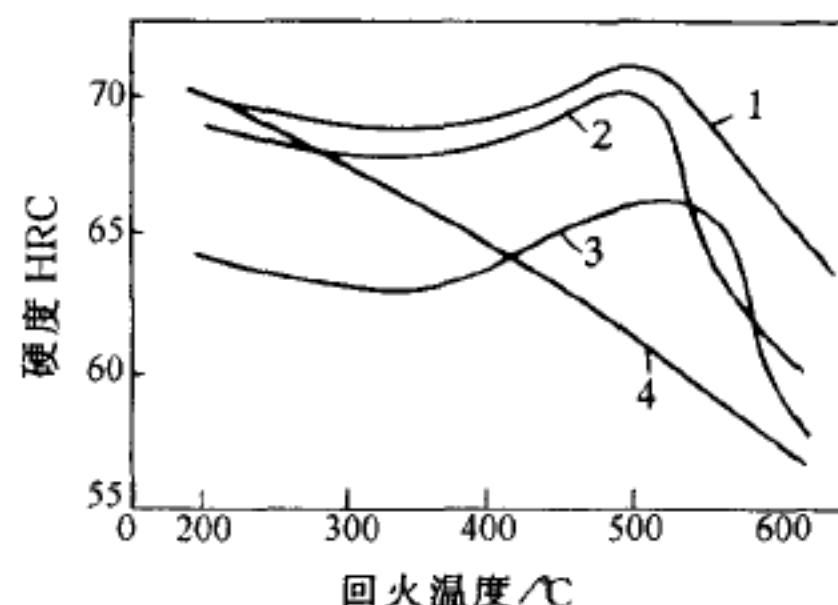


图 15-20 几种钢结合金的回火特性曲线

1—Ti 合金 2—R5 合金 3—R8 合金 4—GT35 合金

表 15-25 时效硬化型钢结合金的热处理工艺规范

牌号 Ferro— TiC	基 体 类 型	热 处 理 工 艺		硬 度 HRC	
		固 溶 处 理	时 效 硬 化	退火态	硬化态
M—6	超低碳高镍马氏体时效钢	在 816℃下保温 1~1.5h 后空冷	在 482℃下保温 3~6h 后空冷	49	63
M—6A	超低碳高镍马氏体时效钢	在 816℃下保温 1~1.5h 后空冷	在 482℃下保温 3~6h 后空冷	54	67
M—6B	超低碳高镍马氏体时效钢	在 816℃下保温 1~1.5h 后空冷	在 482℃下保温 3~6h 后空冷	58	68
MS—5	镍铬马氏体不锈钢	在 980℃下保温 30min 后空冷	在 482℃下保温 10h 后空冷	46~50	60~62
HT—2	铁铬镍奥氏体合金	在 1093℃下保温 15h 后空冷	在 788℃下保温 8h 后空冷	43~45	51~54

表 15-26 用不同硬质相及高速钢制备的钢结硬质合金的性能变化

合金 序号	成分(质量分数)(%)				$\frac{V_{\text{碳化物}}}{V_{\text{高速钢}}}$	密度 /g·cm ⁻³	硬 度 HRC			可加工性
	TiC	WC	W18Cr4V 高速钢	Mo9Cr4V 高速钢			退火态	淬火态	560℃三 次回火态	
1	30	—	70	—	43.2/56.8	7.02	43~46	70~73	66~68	易
2	—	40	60	—	27/73	10.60	50~54	59~61	70~72	难
3	23	7	70	—	39/61	7.56	43~46	68	68	易
4	25	5	70	—	40.5/59.5	7.41	43~46	65	65	易
5	5	25	70	—	24.5/75.5	9.47	52~53	60~63	70	难
6	5	25	—	70	23/77	8.62	41~43	53~55	66	易
7	30	—	—	70	41.2/58.8	6.70	42~44	66~69	67	易

表 15-27 典型合金工具钢钢结硬质合金各种热处理状态的组织特征

牌号或代号	组 织 特 征				
	烧结态	退火态	淬火态	回 火 态 ^①	
				低 温	高 温
GT35	TiC + 贝氏体	TiC + 球光体	TiC + 马氏体	TiC + 回火马氏体 + 碳化物	TiC + 索氏体(或 托氏体) + 碳化物
R5	TiC + 马氏体 + (Cr, Fe) ₇ C ₃	TiC + α 铁素体 + (Cr, Fe) ₂₃ C ₆ + (Cr, Fe) ₇ C ₃	TiC + 淬火马氏体 + (Cr, Fe) ₇ C ₃	TiC + 回火马氏体 + (Cr, Fe) ₇ C ₃	TiC + 索氏体(Cr, Fe) ₂₃ C ₄ + (Cr, Fe) ₇ C ₃
TLMW50	WC + 细珠光体	WC + 珠光体 + 复 式碳化物	WC + 马氏体	WC + 回火马氏体 + 复式碳化物	WC + 索氏体 + 复 式碳化物

(续)

牌号或代号	组 织 特 征				
	烧结态	退火态	淬火态	回 火 态 ^①	
				低 温	高 温
GW50	WC + 细珠光体	WC + 珠光体 + 复 式碳化物	WC + 马氏体	WC + 回火马氏体 + 复式碳化物	WC + 索氏体 + 复 式碳化物
GJW50	WC + 索氏体 + 复式碳化物	WC + 索氏体 + 复 式碳化物	WC + 马氏体 + 残 留奥氏体	WC + 回火马氏体	WC + 索氏体

① < 300℃回火态;回火马氏体;450℃回火态;托氏体;600℃回火态;索氏体。

表 15-28 典型不锈钢钢结硬质合金各种热处理状态的组织特征

牌号或代号	组 织 特 征			备 注
	烧结态	退火态	硬化态	
R8	TiC + 铁素体 + 复式碳 化物桥接相	TiC + 铁素体 + 复式碳 化物桥接相	TiC + 铁素体 + 少量马 氏体	有淬火硬化效应
ST60	TiC + 奥氏体	TiC + 奥氏体		无热处理效应

表 15-29 典型高速钢钢结硬质合金各种热处理状态的组织特征

牌号或代号	组 织 特 征			
	烧 结 态	退 火 态	淬 火 态	500℃回火态
D1	TiC + 极细珠光体(托氏体)	TiC + 球化体 + 碳化物	TiC + 马氏体 + 残留奥氏体	TiC + 托氏体 + 碳化物
T1	TiC + 极细珠光体(托氏体)	TiC + 球化体 + 碳化物	TiC + 马氏体 + 残留奥氏体	TiC + 托氏体 + 碳化物

表 15-30 典型高锰钢钢结硬质合金各种热处理状态的组织特征

牌 号 或 代 号	组 织 特 征	
	烧 结 态	水 韧 处 理 态
TM60	TiC + 珠光体 + 碳化物	TiC + 奥氏体
TM52	TiC + 珠光体 + 碳化物	TiC + 奥氏体

表 15-31 典型不锈钢钢结合金的物理力学性能

牌号或代号	密度 $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	硬度 HRC		抗弯强度 $/\text{MPa}$	冲击韧度 $/\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$	摩擦系数 ^①	矫顽力 $/\times 80\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$
		烧结态	淬火态				
R8	6.15 ~ 6.35	40 ~ 46	62 ~ 66	1000 ~ 1200	1.47	0.215	53
ST60	5.7 ~ 5.9	70	70	1400 ~ 1600	2.94	—	82

① 采用国产 MM200 摩擦磨损试验机。对偶材料为石墨,干态滑动摩擦。

表 15-32 典型高速钢钢结合金的物理力学性能

牌号 或 代号	密度 $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	硬度 HRC			抗弯强度 $/\text{MPa}$	冲击 韧度 $/\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$	抗拉强度/ MPa		抗扭强度/ MPa		矫顽力 $/\times 80\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$
		退火态	淬火态	三次回火态 (500℃)			与 W18Cr4V 对焊	与 45Cr 对焊	与 W18Cr4V 对焊	与 45Cr 对焊	
D1	6.90 ~ 7.10	40 ~ 48	69 ~ 73	66 ~ 69	1400 ~ 1600	—	> 690	545	> 830	> 755	—
T1	6.60 ~ 6.80	44 ~ 48	68 ~ 72	70.1	1300 ~ 1500	3 ~ 5	—	—	—	—	80

注:断裂发生在对焊的钢基上。

表 15-33 美国钢结硬质合金的力学性能

牌号 Ferro- TiC	碳化物 (%, 体积)	基体合金类型	硬度 HRC		加工性 评价 ^①	最高工 作温度 /℃	密度 /g· cm ⁻³	弹性 模量 /GPa	抗弯 强度 /MPa	抗压 强度 /MPa	冲击韧度 /J·cm ⁻²
			退火态	硬化态							
CM	45	高铬工具钢	46	69	2	535	6.45	31000	1750	3400	420
C	45	中合金工具钢	43	70	2	200	6.60	31000	2100	2900	550
SK	40	热作工具钢	38	65	1	535	6.80	27500	2160	2500	830
LT	40	时效硬化钴铁合金	45	55	4	650	6.66	27506	1800	—	790
CRHS	15	高速钢	37	66	1	650	8.25	24600	1500	—	880
CS—40	45	马氏体不锈钢	50	68	3	425	6.45	31000	1750	3200	340
M—6	45	时效硬化马氏体钢	49	63	3	450	6.68	30200	2250	1550	900
MS—5	45	时效硬化马氏体不锈钢	49	62	4	450	6.55	29500	1950	2550	830
HT—2	45	时效硬化镍铁合金	44	54	5	760	6.37	29500	1750	2100	820
HT—6	45	时效硬化镍基合金	46	54	6	1090	6.67	31800	2150	1890	840
HT—6A	35	时效硬化镍基合金	46	50	3	1090	7.00	28100	1400	—	1000
CN—5	45	时效硬化铜镍合金	44	52	5	450	11.80	23200	1950	—	—
J	40	高速钢	50	70	4	650	8.80	31000	1600	2950	340
S—45	45	奥氏体不锈钢	45	—	5	650	6.40	31000	1950	—	—

① 评价“1”的牌号能很容易地进行铣、车、攻丝、刨或其他机加工；评价“6”的牌号趋于加工困难，或仅能考虑像车、锯或磨削。

表 15-34 高锰钢钢结合金与其他耐磨材料的耐磨性对比试验结果

序号	耐 磨 材 料	热处理方式	硬 度 HRC	相对耐磨性 ^① β
1	ZGMn13	1050℃水淬	210HV	1.16
2	Mn13($w_c 1.53\%$)	1050℃水淬	230HV	1.30
3	高韧白口铸铁	900℃加热 300℃等温淬火	58	1.47
4	高韧白口铸铁	900℃油淬	62~64	1.23
5	45SiMn2VB 铸钢	960℃淬火 180℃回火	—	1.24
6	7Cr2WVS 铸钢	1000℃淬火, 400℃回火	—	1.37
7	GT35 钢结合金	950℃油淬, 200℃回火	68~70	9.0
8	TM52 钢结合金	1050℃水淬	61~62	16.5

① 采用 20 号热轧钢($HV = 190MPa$)作为标准材料。所谓相对耐磨性是指材料的磨损量与标准材料磨损量之比值。从表中可以看出, TM52 的耐磨性比硬度与其相当的高锰钢要高十几倍, 而同样以 TiC 作硬质相的 GT35, 尽管其硬度比 TM52 高, 但耐磨性几乎比 TM52 低一半。这再次表明, 钢结合金的耐磨性与钢基体组织状态有很大关系。

15.3 硬质合金热处理工艺及性能(表 15-35 ~ 表 15-37,图 15-21 ~ 图 15-24)

表 15-35 我国硬质合金的牌号、化学成分和物理、力学性能

类别	牌号	代号	化学成分(质量分数)(%)				物理、力学性能		
			WC	TiC	NbC	Co	密度 /kg·cm ⁻³	硬度 HRC (不低于)	抗弯强度 /×10 ⁷ MPa (不低于)
钨钴型	钨钴 3 合金	YG3	97	—	—	3	14.9 ~ 15.3	91	105
	钨钴 3X 合金	YG3X	97	—	—	3	15.0 ~ 15.3	92	100
	钨钴 4C 合金	YG4C	96	—	—	4	14.9 ~ 15.2	90	140
	钨钴 6 合金	YG6	94	—	—	6	14.6 ~ 15.0	89.5	140
	钨钴 6X 合金	YG6X	94	—	—	6	14.6 ~ 15.0	91	135
	钨钴 8 合金	YG8	92	—	—	8	14.4 ~ 14.8	89	150
	钨钴 8C 合金	YG8C	92	—	—	8	14.4 ~ 14.8	88	175
	钨钴 11 合金	YG11	89	—	—	11	14.0 ~ 14.4	88	180
	钨钴 11C 合金	YG11C	89	—	—	11	14.0 ~ 14.4	87	200
	钨钴 15 合金	YG15	85	—	—	15	13.0 ~ 14.1	87	200
	钨铌钴合金	YA6	92	—	2	6	14.4 ~ 15.0	92	140
钨钛钴型	钨铌钴合金	YG8N	91 ~ 91.8	—	1	7.5 ~ 8	14.67	91	210
	钨钛钴 5 合金	YT5	85	6	—	9	12.5 ~ 13.2	89.5	130
	钨钛钴 14 合金	YT14	78	14	—	8	11.2 ~ 12.7	90.5	120
	钨钛钴 15 合金	YT15	79	15	—	6	11.0 ~ 11.7	91	115
	钨钛钴 30 合金	YT30	66	30	—	4	9.35 ~ 9.7	92.8	90
	钨钛铌钴合金	YW1	86	4	4	6	12.6 ~ 13.0	92	125
	钨钛铌钴合金	YW2	84	4	4	8	12.4 ~ 12.9	91	150

注:C—粗颗粒,X—细颗粒。

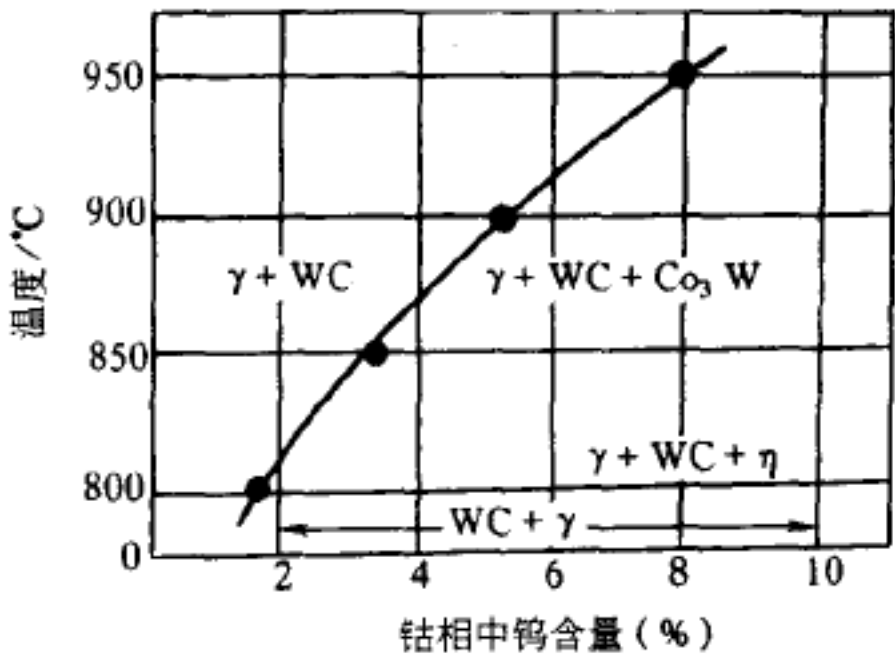


图 15-21 WC-*w*_{Co}10% 两相合金粘 结相中 W 的固溶度 (含量均指质量分数)

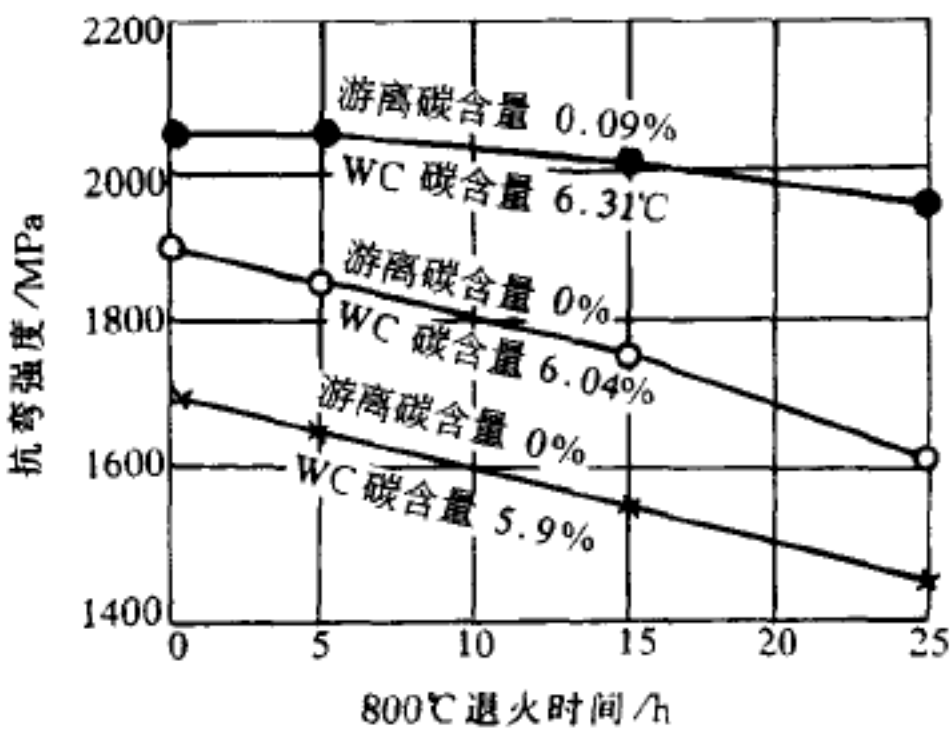


图 15-22 800℃ 退火对 WC-*w*_{Co}10% 合金抗弯强度的影响 (含量均指质量分数)

表 15-36 650℃ 退火对 WC-*w*_{Co}11% 合金抗弯强度的影响

退火时间/h	抗弯强度/MPa
165	2590 ± 250
	2320 ± 250

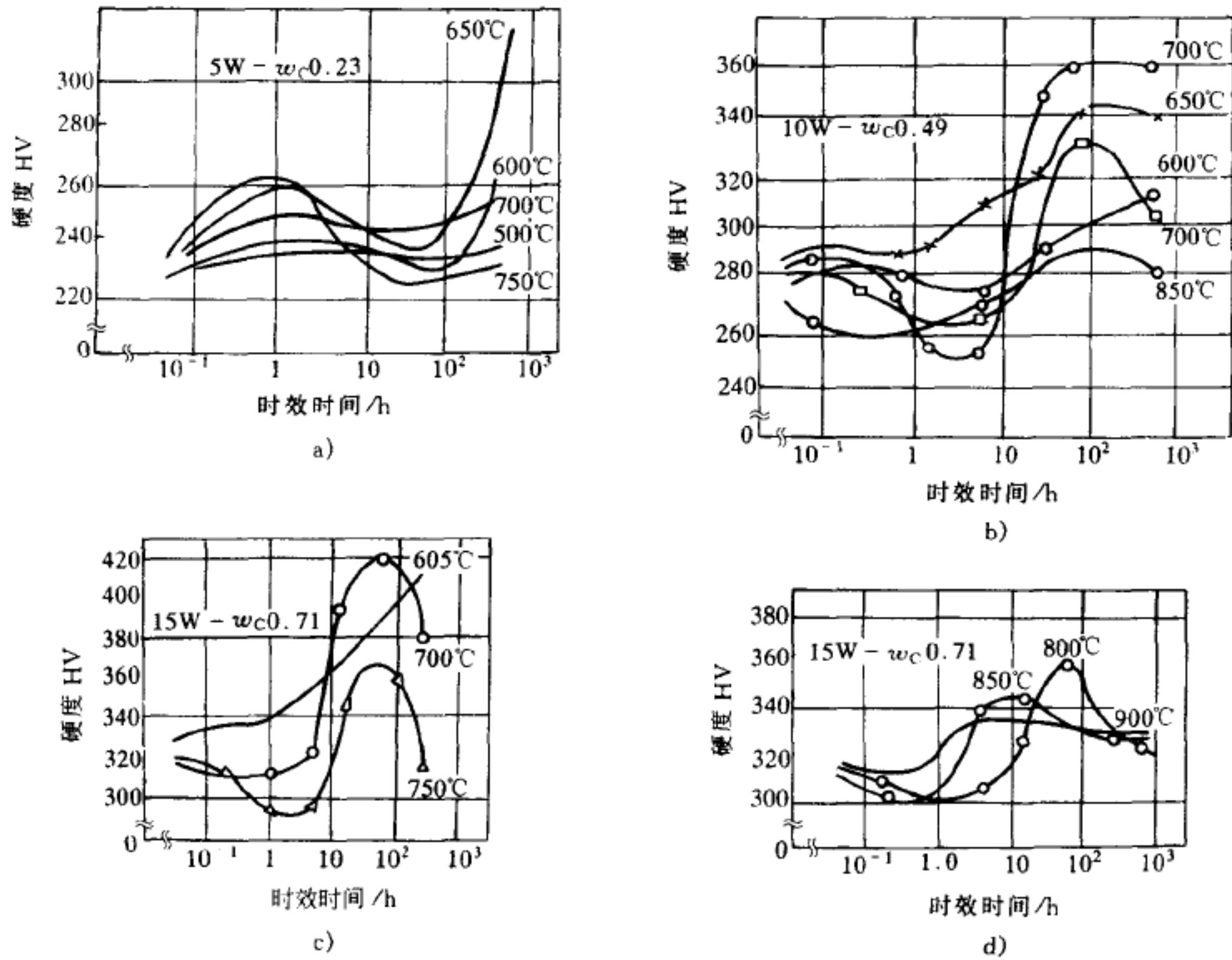


图 15-23 WC-Co 合金粘结相硬度与时效时间的关系

表 15-37 Co 过饱和固溶体等温分解时的相转变(溶解温度 1250℃)

温度范围/℃	相 转 变
950 ~ 1250	$\alpha\text{-Co(W,C)} \rightarrow \alpha\text{-Co} + \text{WC}$
350 ~ 950	$\alpha\text{-Co(W,C)} \rightarrow \alpha\text{-Co(重结晶)} + \eta_1 + \text{WC} \rightarrow \alpha\text{-Co} + \eta' + \text{WC}$
750 ~ 850	$\alpha\text{-Co(W,C)} \rightarrow \alpha\text{-Co(C)} + \text{Co}_3\text{W} \rightarrow \epsilon\text{-Co} + \eta_1 + \text{WC} \rightarrow \epsilon\text{-Co(7)} + \eta' + \text{WC}$
725 ~ 775	$\alpha\text{-Co(W,C)} \rightarrow \alpha\text{-Co} + \alpha' \rightarrow \alpha\text{-Co(C)} + \text{Co}_3\text{W(针)}$
600 ~ 750	$\alpha\text{-Co(W,C)} \rightarrow \alpha\text{-Co} + \alpha' \rightarrow \epsilon\text{-Co(C)} + \text{Co}_3\text{W(六方)}$
650 ~ 750	$\epsilon\text{-Co(W,C)} \rightarrow \epsilon\text{-Co(C)} + \text{Co}_3\text{W(针)}$
550 ~ 650	$\epsilon\text{-Co(W,C)} \rightarrow \epsilon\text{-Co(C)} + \epsilon' \rightarrow \epsilon\text{-Co(C)} + \text{Co}_3\text{W(针)}$
550 ~ 650	$\epsilon\text{-Co(W,C)} \rightarrow \epsilon\text{-Co(C)} + \epsilon' \rightarrow \epsilon\text{-Co(C)} + \text{Co}_3\text{W(六方)}$
250 ~ 400	$\epsilon\text{-Co(W,C)} \rightarrow \epsilon\text{-Co(W)} + \text{Co}_3\text{C}$

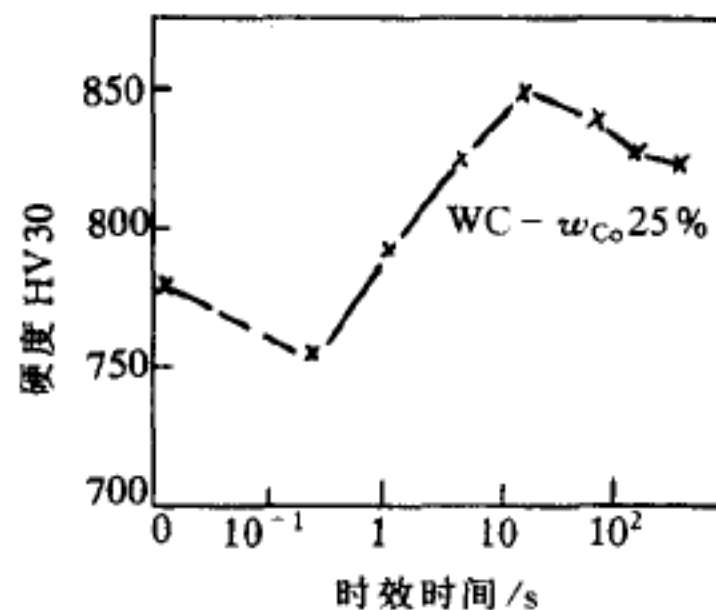


图 15-24 WC-Co 合金硬度与时效时间的关系

第 16 章 工模具、量具的热处理

16.1 工模具、量具钢的化学成分和物理化学性能(表 16-1 ~ 表 16-10)

表 16-1 碳素工具钢化学成分

序号	牌号	化学成分(质量分数)(%)					序号	牌号	化学成分(质量分数)(%)				
		C	Mn	Si	S	P			C	Mn	Si	S	P
1	T7	0.65 ~ 0.75	≤0.40				9	T7A	0.65 ~ 0.75	≤0.40			
2	T8	0.75 ~ 0.84					10	T8A	0.75 ~ 0.84				
3	T8Mn	0.80 ~ 0.90					11	T8MnA	0.80 ~ 0.90				
4	T9	0.85 ~ 0.94	≤0.40	≤0.35	≤0.030	≤0.035	12	T9A	0.85 ~ 0.94	≤0.40	≤0.35	≤0.020	≤0.030
5	T10	0.95 ~ 1.04					13	T10A	0.95 ~ 1.04				
6	T11	1.05 ~ 1.14					14	T11A	1.05 ~ 1.14				
7	T12	1.15 ~ 1.24					15	T12A	1.15 ~ 1.24				
8	T13	1.25 ~ 1.35					16	T13A	1.25 ~ 1.35				

注：1. 平炉冶炼的钢硫含量：优质钢不大于 0.035%，高级优质钢不大于 0.025%。

2. 钢中允许残余元素含量（质量分数）：铬 ≤0.25%；镍 ≤0.20%；铜 ≤0.30%，供制造铅浴淬火钢丝时，钢中允许残余元素含量：铬 ≤0.10%；镍 ≤0.12%；铜 ≤0.20%；三者之和 ≤0.40%。

3. 要求检验淬透性时，允许钢中加入少量合金元素。

表 16-2 碳素工具钢的性能特点与用途

钢 号	性能特点和使用范围	用 途 举 例
T7 T7A	具有较好的韧性和硬度，但可加工性能较差，强度较低 适于制作要求适当硬度、能承受冲击载荷并具有较好韧性的各种工具	小尺寸风动工具，瓦工慢子，木工用锯，凿子，钳工工具，冲头，锤子，铁皮剪等 形状简单、承受载荷轻的小型冷作模具、压模、铆钉模及热固性塑料压缩模等
T8 T8A	淬火加热时容易过热，变形也大，塑性与强度较低，热处理后有较高硬度和耐磨性 适于制作要求较高硬度、耐磨、承受冲击载荷不大的各种工具	加工木材的铣刀、埋头钻、平头铰钻、斧子、凿子、手锯条，冲头，台钳牙，锉刀，车刀等 冷镦模、拉深模、压印模、纸品下料模、热固性塑料压缩模等
T8Mn T8MnA	性能与 T8、T8A 相近，但提高了淬透性，工件可获得较深的淬硬层 适于制作截面较大的工具	可制作 T8、T8A 钢能制作的各種工具，还可制作横纹锉刀、手锯条、采煤和岩石凿子等

(续)

钢 号	性能特点和使用范围	用 途 举 例
T9 T9A	具有较高的硬度和耐磨性, 性能与 T8、T8A 相近 适于制作要求较高硬度且有一定韧性的各种工具	木工工具、锯条、锉刀、丝锥、板牙、农机切割刀片等 冷冲模、冲孔冲头等
T10 T10A	在淬火加热 (700 ~ 800℃) 时, 仍能保持细晶粒组织, 不至过热。淬火后钢中有未溶的过剩碳化物, 增加钢的耐磨性 适于制作要求有较高耐磨性、刃口锋利且稍有韧性的工具	加工木材工具、手用横锯及细木工锯、机用细木工工具、麻花钻、车刀、刨刀、铣刀、铰刀、板牙、丝锥、刮刀、锉刀、刻纹工具等 冷镦模、冲模、拉丝模、铝合金用冷挤压凹模、纸品下料模、塑料成型模具等
T11 T11A	与 T10、T12 相比, 具有较好的综合力学性能, 如硬度、耐磨性及韧性等。对晶粒长大及形成碳化物网的敏感性较小 适于制作要求切削时刃口不易变热的工具	丝锥、锉刀、扩孔铰刀、板牙、刮刀、量规、木工工具等 冷镦模、尺寸不大的冷冲模、软材料用切边模等
T12 T12A	钢的碳含量高, 淬火后有较多的过剩碳化物, 因硬度和耐磨性均高, 而韧性低 适于制作不受冲击载荷、切削速度不高、切削刃口不变热的工具	车刀、铣刀、刮刀、钻头、铰刀、扩孔钻、丝锥、板牙、量规、切烟草刀、锉刀等 冷镦模、拉丝模、小截面的冷冲模与切边模、塑料成型模具等
T13 T13A	碳素工具钢中碳含量最高的钢种, 硬度很高, 碳化物增加且分布不均匀, 力学性能差 适于制作不承受冲击载荷的硬金属切削工具	刮刀、锉刀、剃刀、切削工具、拉丝工具、刻纹工具及硬石加工工具等

表 16-3 合金工具钢化学成分

序号	钢组	钢 号	化学成分(质量分数)(%)									
			C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	其他	P	S
1-1	量具、刀具用钢	9SiCr	0.85 ~ 0.95	1.20 ~ 1.60	0.30 ~ 0.60	0.95 ~ 1.25					≤0.03	≤0.03
1-2		8MnSi	0.75 ~ 0.85	0.30 ~ 0.60	0.80 ~ 1.10						≤0.03	≤0.03
1-3		Cr06	1.30 ~ 1.45	≤0.40	≤0.40	0.50 ~ 0.70					≤0.03	≤0.03
1-4		Cr2	0.95 ~ 1.10	≤0.40	≤0.40	1.30 ~ 1.65					≤0.03	≤0.03
1-5		9Cr2	0.80 ~ 0.95	≤0.40	≤0.40	1.30 ~ 1.70					≤0.03	≤0.03
1-6		W	1.05 ~ 1.25	≤0.40	≤0.40	0.10 ~ 0.30	0.80 ~ 1.20				≤0.03	≤0.03

(续)

序号	钢组	钢 号	化学成分(质量分数)(%)									
			C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	其他	P	S
2-1	耐冲击工具用钢	4CrW2Si	0.35 ~ 0.45	0.80 ~ 1.10	≤0.40	1.00 ~ 1.30	2.00 ~ 2.50				≤0.03	≤0.03
2-2		5CrW2Si	0.45 ~ 0.55	0.50 ~ 0.80	≤0.40	1.00 ~ 1.30	2.00 ~ 2.50				≤0.03	≤0.03
2-3		6CrW2Si	0.55 ~ 0.65	0.50 ~ 0.80	≤0.40	1.00 ~ 1.30	2.20 ~ 2.70				≤0.03	≤0.03
3-1	冷作模具钢	Cr12	2.00 ~ 2.30	≤0.40	≤0.40	11.50 ~ 13.00					≤0.03	≤0.03
3-2		Cr12Mo1V	1.40 ~ 1.60	≤0.40	≤0.40	11.00 ~ 13.00		0.70 ~ 1.20	≤1.10	Co ≤ 1.10	≤0.03	≤0.03
3-3		Cr12MoV	1.45 ~ 1.70	≤0.40	≤0.40	11.00 ~ 12.50		0.40 ~ 0.60	0.15 ~ 0.30		≤0.03	≤0.03
3-4		Cr5Mo1V	0.95 ~ 1.05	≤0.50	≤1.00	4.75 ~ 5.50		0.90 ~ 1.40	0.15 ~ 0.50		≤0.03	≤0.03
3-5		9Mn2V	0.85 ~ 0.95	≤0.40	1.70 ~ 2.00				0.10 ~ 0.25		≤0.03	≤0.03
3-6		CrWMn	0.90 ~ 1.05	≤0.40	0.80 ~ 1.10	0.90 ~ 1.20	1.20 ~ 1.60				≤0.03	≤0.03
3-7		9CrWMn	0.85 ~ 0.95	≤0.40	0.90 ~ 1.20	0.50 ~ 0.80	0.50 ~ 0.80				≤0.03	≤0.03
3-8		Cr4W2MoV	1.12 ~ 1.25	0.40 ~ 0.70	≤0.40	3.50 ~ 4.00	1.90 ~ 2.60	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.10		≤0.03	≤0.03
3-9		6Cr4W3Mo2VNB	0.60 ~ 0.70	≤0.40	≤0.40	3.80 ~ 4.40	2.50 ~ 3.50	1.80 ~ 2.50	0.80 ~ 1.20	Nb0.20 ~ 0.35	≤0.03	≤0.03
3-10		6W6Mo5Cr4V	0.55 ~ 0.65	≤0.40	≤0.60	3.70 ~ 4.30	6.00 ~ 7.00	4.50 ~ 5.50	0.70 ~ 1.10		≤0.03	≤0.03
4-1	热作模具钢	5CrMnMo	0.50 ~ 0.60	0.25 ~ 0.60	1.20 ~ 1.60	0.60 ~ 0.90		0.15 ~ 0.30			≤0.03	≤0.03
4-2		5CrNiMo	0.50 ~ 0.60	≤0.40	0.50 ~ 0.80	0.50 ~ 0.80		0.15 ~ 0.30		Ni1.40 ~ 1.80	≤0.03	≤0.03
4-3		3Cr2W8V	0.30 ~ 0.40	≤0.40	≤0.40	2.20 ~ 2.70	7.50 ~ 9.00		0.20 ~ 0.50		≤0.03	≤0.03
4-4		5Cr4Mo3SiMnVAI	0.47 ~ 0.57	0.80 ~ 1.10	0.80 ~ 1.10	3.80 ~ 4.30		2.80 ~ 3.40	0.80 ~ 1.20	Al0.30 ~ 0.70	≤0.03	≤0.03
4-5		3Cr3Mo3W2V	0.32 ~ 0.42	0.60 ~ 0.90	≤0.65	2.80 ~ 3.30	1.20 ~ 1.80	2.50 ~ 3.00	0.80 ~ 1.20		≤0.03	≤0.03
4-6		5Cr4W5Mo2V	0.40 ~ 0.50	≤0.40	≤0.40	3.40 ~ 4.40	4.50 ~ 5.30	1.50 ~ 2.10	0.70 ~ 1.10		≤0.03	≤0.03
4-7		8Cr3	0.75 ~ 0.85	≤0.40	≤0.40	3.20 ~ 3.80					≤0.03	≤0.03

(续)

序号	钢组	钢 号	化学成分(质量分数)(%)									
			C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	其他	P	S
4-8	热作模具钢	4CrMnSiMoV	0.34 ~ 0.45	0.80 ~ 1.10	0.80 ~ 1.10	1.30 ~ 1.50		0.40 ~ 0.60	0.20 ~ 0.35		≤0.03	≤0.03
4-9		4Cr3Mo3SiV	0.35 ~ 0.45	0.80 ~ 1.20	0.25 ~ 0.70	3.00 ~ 3.75		2.00 ~ 3.00	0.25 ~ 0.75		≤0.03	≤0.03
4-10		4Cr5MoSiV	0.33 ~ 0.43	0.80 ~ 1.20	0.20 ~ 0.58	4.75 ~ 5.50		1.10 ~ 1.60	0.30 ~ 0.60		≤0.03	≤0.03
4-11		4Cr5MoSiV1	0.32 ~ 0.45	0.80 ~ 1.20	0.20 ~ 0.50	4.75 ~ 5.50		1.10 ~ 1.75	0.80 ~ 1.20		≤0.03	≤0.03
4-12		4Cr5W2VSi	0.32 ~ 0.42	0.80 ~ 1.20	≤0.40	4.50 ~ 5.50	1.60 ~ 2.40		0.60 ~ 1.00		≤0.03	≤0.03
5-1	无磁模具钢	7Mn15Cr2Al3V2-WMo	0.65 ~ 0.75	≤0.80	14.50 ~ 16.50	2.00 ~ 2.50	0.50 ~ 0.80	0.50 ~ 0.80	1.50 ~ 2.00	Al2.30 ~ 3.30	≤0.06	≤0.03
6-1	塑料模具钢	3Cr2Mo	0.28 ~ 0.40	0.20 ~ 0.80	0.60 ~ 1.00	1.40 ~ 2.00		0.30 ~ 0.55			≤0.03	≤0.03

表 16-4 合金工具钢的性能特点和用途

钢 号	性能特点	用途举例
9SiCr	是用途广泛的低合金工具钢,其淬透性、淬硬性较高,耐回火性较好,优于碳素工具钢和铬工具钢。适用于分级淬火、等温淬火,热处理时变形小;因含 Si,脱碳倾向较大	常用于制造形状复杂、变形小、耐磨性高的低速切削刀具,如钻头、丝锥、板牙、铰刀、齿轮铣刀、拉刀等;也可用作冷作模具,如冷冲模、打印模,还用作冷轧辊、校正辊等
8MnSi	其淬透性、韧性和耐磨性均优于碳素工具钢	常用作木工工具如凿子、锯条,以及小尺寸热锻模和冲头、热压锻模、螺栓、道钉冲模、拔丝模、冷冲模;还用作穿孔器与扩孔器工具及切削工具
Cr06	与 Cr2 和 9Cr2 相比,其碳含量最高,Cr 含量最低,淬火后硬度和耐磨性都很高,刃口锋利,但较脆	大多冷轧成薄钢带后使用,常用于制作剃须刀片、手术刀具,也可用作刮刀、锉刀、刻刀等
Cr2	淬火后的硬度和耐磨性都很高,淬火变形不大,但高温塑性差	常用于低速、进给量小、加工材料硬度不高的切削刀具,如车刀、铣刀、插刀、铰刀等;还用于冷作模具、拉丝模、冷轧辊,以及量具、量规、样板、偏心轮、钻套等
9Cr2	性能与 Cr2 基本相似,因碳含量稍低,其韧性较 Cr2 好	主要用作冷轧辊、冷冲模及冲头、钢印冲孔凿、木工工具等
W	淬火后的硬度和耐磨性较碳素工具钢好,热处理变形小,水淬不易开裂,耐回火性较好	常用于工作温度不高、切削速度不大的刀具,如小型麻花钻、丝锥、板牙、铰刀、辊式刀具等

(续)

钢 号	性能特点	用途举例
4CrW2Si	高温时有较好的强度和硬度,回火后有较高的韧性	用于高冲击载荷下操作的工具,如风动工具、冲裁切边复合模、冲模等冲剪工具,以及部分小型热作模具,如中应力热锻模、受热低的压铸模等
5CrW2Si	性能与 4CrW2Si 相近,回火后有较高的韧性,有一定的淬透性和高温力学强度,热处理时对脱碳、变形和开裂的敏感性不大	用于手动和风动錾子、空气锤工具、铆钉工具、重振动的切割器、冷冲裁和切边用凹模;也用于热作工具,如热冲孔和穿孔工具、热剪切模、热锻模、易熔合金的压铸模等
6CrW2Si	与 4CrW2Si 和 5CrW2Si 相比,具有较高的淬火硬度和一定的高温强度	常用于承受冲击载荷且要求耐磨性高的工具,如风动工具、錾子、冲击模具、铸造精整工具等;也用于热作工具,如生产螺钉和热铆的冲头、高温压铸轻合金的顶头、热锻模等
Cr12	应用广泛的冷作模具钢,具有较高的强度、淬透性和耐磨性,淬火变形小;但冲击韧性较差,易脆裂,易形成不均匀的共晶碳化物,导热性与高温塑性也较差	常用于制造承受冲击载荷小和耐磨性高的冷冲模、冲头、冷剪切刀、冷轧辊、钻套和拉丝模,以及量规、样板、凸轮销、偏心轮等
Cr12Mo1V1	国际上广泛应用的冷作模具钢,属莱氏体钢。具有高的淬透性、淬硬性和耐磨性;热处理变形小,高温抗氧化性能、淬火与抛光后抗锈蚀性能良好	用于制造各种高精度、长寿命的冷作模具、刀具和量具,如形状复杂的冲孔凹模、冷挤压模,冷剪切刀、搓螺纹板、滚螺纹轮等
Cr12MoV	淬透性高,截面为 300~400mm 以下的工件可完全淬透,其淬火回火后的硬度、强度、韧性均比 Cr12 高,耐磨性和塑性也较好,变形小,但高温塑性差	用于制造截面较大、形状复杂、经受较大冲击载荷的各种工模具,如各种冲孔凹模,切边模、钢板拉深模、滚边模、拉丝模、缝口模、搓螺纹板、冷挤压模、冷切剪刀、圆锯片、标准工具、量具等
Cr5Mo1V	相当于美国 A2 钢,具有良好的空淬性能,空淬尺寸变形小,韧性比 9Mn2V、Cr12 均好,碳化物均匀细小,耐磨性好	用于制造韧性好、耐磨性高的冷作模具,如成形模、下料模、冲头、冷冲裁模等
9Mn2V	经济型冷作工具钢,价格不高而综合力学性能优于碳素工具钢,具有较高硬度和耐磨性,淬透性好,淬火后变形小,过热敏感性低	用于制作各种精密量具、样板、块规、板牙;也用于要求变形小、耐磨性高的精密丝杠、磨床主轴,以及尺寸较小的冲模、冷压模、雕刻模、落料模等
CrWMn	用途广泛的微变形钢,淬透性好,变形小,淬火低温回火后有高的硬度、耐磨性和尺寸稳定性,且韧性较好,缺点是易形成网状碳化物	用于制作量规及形状复杂、高精度的冷冲模;也用于制作要求变形小、长而形状复杂的切削刀具,如拉刀、长丝锥、长铰刀、专用铣刀等
9CrWMn	性能与 CrWMn 相近,但由于碳含量稍低,碳化物偏析比 CrWMn 好此,因而力学性能更好,但热处理后硬度稍低	用于制作形状复杂、高精度的冷冲模,以及各种量规量具等

(续)

钢 号	性能特点	用途举例
Cr4W2MoV	新型中合金冷作模具钢,共晶化合物颗粒细小,分布均匀,具有较高的淬透性和淬硬性,且有较好的综合力学性能、耐磨性和尺寸稳定性	用于制造冷冲模、冷挤凹模、落料模、搓螺纹板等
7CrSiMnMoV	火焰淬火冷作模具钢,具有较好的淬透性,淬火温度范围宽,过热敏感性小,淬火后获得较高的表面硬度、耐磨性和良好的韧性,热处理变形小	用于大型镶块模具、下料模、冲头、成形模、拉深模、冷冲模、胶木模、陶土模、剪刀刃、切纸刀、轧辊以及机床导轨镶条等
6Cr4W3Mo2VNb	基体钢类型高强韧性冷作模具钢,具有高强度、高硬度,且韧性好,又有较高的疲劳强度	用于制造冲击载荷及形状复杂的冷作模具、冷挤压模具、冷锻模具、螺钉冲头、冷冲模、冷剪模等
6W6Mo5Cr4V	低碳高速钢类型冷作模具钢,有较好的淬透性,并具有高硬度、高耐磨性、高强度和良好的热硬性,且韧性好	用于制造高冲击载荷下抗磨损的模具、冷挤压模、拉深模、冷锻模、成形模、冷冲模、冲头等
5CrMnMo	不含镍的热作模具钢,性能与 5CrNiMo 相近,淬透性稍差;此钢具有良好的韧性、强度和高耐磨性,对回火脆性不敏感	用于形状简单的小型锻压模具,如模锻锤用模块等(边长 $\leq 300 \sim 400\text{mm}$)
5CrNiMo	具有良好的韧性、强度和高耐磨性,并有良好的淬透性,在高温下的韧性及耐热疲劳性高于 5CrMnMo	国内已广泛用于各种中、大型锤锻模,但近年认为不宜用于制造大型、复杂的和工作温度较高的重载荷模具
3Cr2W8V	属莱氏体钢,在高温下有较高的硬度,但其韧性和塑性较差,淬透性中等,截面厚度 $\leq 80\text{mm}$ 可淬透;此钢相变温度较高,耐热疲劳性良好	用于作高温、高应力但不受冲击载荷的凸模、凹模,如平锻机上的凸凹模、镶块、铜合金挤压模、压铸用模具;还可作高温下工作的热剪切刀等
5Cr4Mo3SiMnVAI	基体钢类型冷热两用的新型工模具钢,淬透性和淬硬性均较好,作为热作模具钢,具有较高的高温强度和较优良的耐热性、冷热疲劳性;作为冷作模具钢,具有较高的韧性	用于标准件行业和轴承行业的热挤压模,以及冷锻模、冲孔凹模等,可以代替 3Cr2W8V、Cr12MoV 使用
3Cr3Mo3W2V	具有良好的冷热加工性能,较高的热强性、热疲劳性能,良好的耐磨性和耐回火性,并有一定的耐冲击抗力,淬硬性较好	用于锻锻模、精锻模、辊锻模、压力机用模具等热作模具

(续)

钢 号	性能特点	用途举例
5Cr4W5Mo2V	新型的热作模具钢,具有较高的热硬性、高温强度和较高的耐磨性、耐回火性及一定的冲击韧度,可进行一般热处理或等温热处理与化学热处理	常用于制造热挤压模具,可代替 3Cr2W8V,也用于制作精锻模、热冲模等
8Cr3	具有较好的淬透性,一定的室温和高温强度,形成细小的碳化物且均匀分布,耐磨性能较好	常用于冲击振动较小的、工作温度低于 500℃ 的耐磨损的模具,如热冲裁模、热切边模、热顶锻模、成形冲模、热弯曲模等
4CrMnSiMoV	具有较高的高温力学性能,耐热疲劳性能好,可代替 5CrNiMo 使用	用于制作锤锻模、压力机锻模、校正模、热弯曲模等
4Cr3Mo3SiV	具有较高的淬透性和高温硬度,以及优良的韧性,可代替 3Cr2W8V 使用	用于制作热挤压模、热锻模、热冲模等
4Cr5MoSiV	空冷硬化型热作模具钢,淬透性好,在中温($\approx 600^{\circ}\text{C}$)条件下具有较好的热强度、热疲劳性能和一定的耐磨性,选用较低的淬火温度空淬,热处理变形小	常用于制造铝合金压铸模、热挤压模、螺栓模、热切边模、锤锻模、压力机锻模、塑料模具,以及穿孔用工具与芯棒等
4Cr5MoSiV1	广泛使用的空冷硬化型热作模具钢,与 4Cr5MoSiV 相比,此钢具有较高的热强度和硬度,在中温条件下具有良好的韧性、热疲劳性能和一定的耐磨性,并且淬透性高,热处理变形小	广泛用于热挤压模具与芯棒、模锻锤的锻模、高速精锻用模具镶块、锻造压力机模具,以及铝合金压铸模等
4Cr5W2VSi	空冷硬化型热作模具钢,在中温下具有较高的硬度和热强度,良好的韧性、耐磨性和热疲劳性能	用于锻压模具、热挤压模具与芯棒、冲头、零部件成形用高速锤锻模,以及铝、锌等轻金属的压铸模等
7Mn15Cr2Al3V2WMo	高 Mn-V 系无磁钢,此钢在各种状态下都能保持稳定的奥氏体,且有非常低的磁导率,高的硬度、强度,较好的耐磨性,但可加工性差	用于制造无磁模具、无磁轴承以及其他要求在强磁场中不产生磁感应的结构零件,也用于 700~800℃ 使用的热作模具
3Cr2Mo	也称 P20,广泛应用的预硬化型塑料模具钢综合力学性能良好,淬透性高,较大截面的钢材能获得较均匀的硬度,且有良好的抛光性能;此钢经预硬化后,再经冷加工制造成模具,可直接使用	用于制造大、中型的和精密的塑料模具,也用于低熔点合金(如锡、锌、铝合金)的压铸模

(续)

钢 号	性能特点	用途举例
3Cr2NiMo	俗称 P20 + Ni, 意即 P20 钢添加 Ni 的改良型牌号。广泛应用的预硬化型塑料模具钢, 该钢具有高的淬透性, 良好的抛光性能、电火花加工性能和皮纹加工性能; 经预硬化后, 再经冷加工制造成模具, 可直接使用	用于制造大型、特大型塑料模具和精密的塑料模具, 也用于低熔点合金的压铸模

表 16-5 高速钢化学成分

序号	类型	牌 号 〔简写代号〕	标准号	化学成分(质量分数)(%)											
				C	W	Mo	Cr	V	Co	Si	Mn	S	P	其他	
												不大于			
1	通用型 高速钢	W18Cr4V 〔18—4—1〕	GB/T 9941 ^① 、 9942 及 9943— 1988	0.70 ~ 0.80	17.5 ~ 19.0	≤0.30	3.80 ~ 4.40	1.00 ~ 1.40			0.20 ~ 0.40	0.10 ~ 0.40	0.030	0.030	
2		W9Mo3Cr4V 〔9—3—4—1〕		0.17 ~ 0.87	8.50 ~ 9.50	2.70 ~ 3.30	3.80 ~ 4.40	1.30 ~ 1.70			0.20 ~ 0.40	0.20 ~ 0.40	0.030	0.030	
3		W6Mo5Cr4V2 〔6—5—4—2〕		0.80 ~ 0.90	5.50 ~ 6.75	4.50 ~ 5.50	3.80 ~ 4.40	1.75 ~ 2.20			0.20 ~ 0.45	0.15 ~ 0.40	0.030	0.030	
4		CW6Mo5Cr4V2 〔高碳 6—5— 4—2〕	GB/T 9943 ^① —1988	0.95 ~ 1.05	5.50 ~ 6.75	4.50 ~ 5.50	3.80 ~ 4.40	1.75 ~ 2.20			0.20 ~ 0.45	0.15 ~ 0.40	0.030	0.030	
5		W2Mo9Cr4V2 〔2—9—4—2〕		0.97 ~ 1.05	1.40 ~ 2.10	8.20 ~ 9.20	3.50 ~ 4.00	1.75 ~ 2.25			0.20 ~ 0.55	0.15 ~ 0.40	0.030	0.030	
6		9W18Cr4V 〔高碳 18—4— 1〕		0.90 ~ 1.00	17.5 ~ 19.0	≤0.30	3.80 ~ 4.40	1.00 ~ 1.40			≤0.40	≤0.40	0.030	0.030	
7	高生产率 高速钢	W14Cr4VMn RE	YB12— 1977 ^② YB/T 2—1980	0.80 ~ 0.90	13.5 ~ 15.0	≤0.30	3.50 ~ 4.00	1.40 ~ 1.70			≤0.50	0.35 ~ 0.55	0.030	0.030	RE 加入 0.07
8		W12Cr4V4Mo 〔12—4—4—1〕		1.20 ~ 1.40	11.5 ~ 13.0	0.90 ~ 1.20	3.80 ~ 4.40	3.80 ~ 4.40			≤0.40	≤0.40	0.030	0.030	
9		W6Mo5Cr4V3 〔6—5—4—3〕	GB/T 9943 ^① —1988	1.00 ~ 1.10	5.00 ~ 6.75	4.75 ~ 6.75	3.75 ~ 4.50	2.25 ~ 2.75			0.20 ~ 0.45	0.15 ~ 0.40	0.030	0.030	
10		CW6Mo5Cr4V3 〔高碳 6—5— 4—3〕		1.15 ~ 1.25	5.00 ~ 6.75	4.75 ~ 6.75	3.75 ~ 4.50	2.75 ~ 3.25			0.20 ~ 0.45	0.15 ~ 0.40	0.030	0.030	

(续)

序号	类型	牌 号 〔简写代号〕	标准号	化学成分(质量分数)(%)										
				C	W	Mo	Cr	V	Co	Si	Mn	S	P	其他
												不大于		
11	一般含钴型	W6Mo5Cr4V2 Co5〔6—5—4— 2—5〕	GB/T 9943 ^① —1988	0.80 ~ 0.90	5.50 ~ 6.50	4.50 ~ 5.50	3.75 ~ 4.50	1.75 ~ 2.25	4.50 ~ 5.50	0.20 ~ 0.45	0.15 ~ 0.40	0.030	0.030	
12		W18Cr4VCo5 〔18—4—1—5〕		0.70 ~ 0.80	17.5 ~ 19.0	0.40 ~ 1.00	3.75 ~ 4.50	0.80 ~ 1.20	4.25 ~ 5.75	0.20 ~ 0.40	0.10 ~ 0.40	0.030	0.030	
13		W18Cr4V2Co8 〔18—4—2—8〕		0.75 ~ 0.85	17.5 ~ 19.0	0.50 ~ 1.25	3.75 ~ 5.00	1.80 ~ 2.40	7.00 ~ 9.50	0.20 ~ 0.40	0.20 ~ 0.40	0.030	0.030	
14	高碳、高钒、含钴型	W12Cr4V5Co5 〔12—4—5—5〕	GB/T 9943 ^① —1988	1.50 ~ 1.60	11.75 ~ 13.00	≤1.00	3.75 ~ 5.00	4.50 ~ 5.25	4.75 ~ 5.25	0.15 ~ 0.40	0.15 ~ 0.40	0.030	0.030	
15		W6Mo3Cr4V5 Co5〔6—3—4— 5—5〕	工厂 标准	1.55 ~ 1.60	5.50 ~ 6.75	2.75 ~ 3.75	4.50 ~ 5.00	4.75 ~ 5.75	4.75 ~ 5.25	≤0.40	≤0.40	0.030	0.030	
16	高生产率高速钢	W6Mo5Cr4V- 2Al〔501〕	GB/T9941 及 9943 —1988 ^①	1.05 ~ 1.20	5.50 ~ 6.75	4.50 ~ 5.50	3.80 ~ 4.40	1.75 ~ 2.20		0.20 ~ 0.60	0.15 ~ 0.40	0.030	0.030	Al: 0.80 ~ 1.20
17		W2Mo9Cr4V- Co8〔2—9—4 —1—8〕	GB/T 9943 ^② —1988	1.05 ~ 1.15	1.15 ~ 1.85	9.00 ~ 10.00	3.50 ~ 4.25	0.95 ~ 1.35	7.75 ~ 8.75	0.15 ~ 0.65	0.15 ~ 0.40	0.030	0.030	
18		W7Mo4Cr4V2- Co5〔7—4—4— 2—5〕		1.05 ~ 1.15	6.25 ~ 7.00	3.25 ~ 4.25	3.75 ~ 4.50	1.75 ~ 2.25	4.75 ~ 5.75	0.15 ~ 0.50	0.20 ~ 0.60	0.030	0.030	
19		W10Mo4Cr4V3 Al〔5F—6〕	YB/T 12— 77 ^② YB/T 2— 1980	1.30 ~ 1.45	9.00 ~ 10.50	3.50 ~ 4.50	3.80 ~ 4.50	2.70 ~ 3.20		≤0.50	≤0.50	0.030	0.030	Al: 0.70 ~ 1.20
20		W6Mo5Cr4- V5Si NbAl〔B201〕		1.55 ~ 1.65	5.50 ~ 6.50	5.00 ~ 6.00	3.80 ~ 4.40	4.20 ~ 5.20		1.00 ~ 1.40	≤0.40	0.030	0.030	Nb: 0.2 ~ 0.5 Al: 0.3 ~ 0.7
21		W12Mo3Cr4V3 Co5Si〔Co5Si〕		1.20 ~ 1.30	11.50 ~ 13.50	2.80 ~ 3.40	3.80 ~ 4.40	2.80 ~ 3.40	4.70 ~ 5.10	0.80 ~ 1.20	≤0.40	0.030	0.030	
22	超硬型	W10Mo4Cr4V3 Co10〔10—4— 4—3—10〕	工厂 标准	1.20 ~ 1.30	9.00 ~ 11.00	3.00 ~ 4.00	3.80 ~ 4.50	3.20 ~ 3.70	9.50 ~ 10.50	≤0.40	≤0.50	0.030	0.030	

(续)

序号	类型	牌 号 〔简写代号〕	标准号	化学成分(质量分数)(%)										
				C	W	Mo	Cr	V	Co	Si	Mn	S	P	其他
												不大于		
23	高生产率高速钢	W12Mo3Cr4V3N 〔V3N〕	工厂标准	1.15 ~ 1.25	11.00 ~ 12.50	2.70 ~ 3.70	3.50 ~ 4.10	2.50 ~ 3.10		≤0.40	≤0.40	0.030	0.030	N: 0.04 ~ 0.10
24		W18Cr4V4SiNbAl〔B212〕		1.48 ~ 1.58	17.5 ~ 18.5		3.80 ~ 4.40	3.00 ~ 3.80		1.00 ~ 1.40	≤0.40	0.030	0.030	Nb: 0.1 ~ 0.2 Al: 1.0 ~ 1.6
25		FW12Cr4V5Co5 ^③	钢铁研究总院企标	1.45 ~ 1.60	12.00 ~ 13.50	≤1.00	3.50 ~ 4.50	4.25 ~ 5.25	4.50 ~ 5.50	≤0.030	≤0.040	0.030	0.030	
26		FW10Mo5Cr4V2Co12 ^③		1.10 ~ 1.20	9.50 ~ 11.00	4.70 ~ 5.20	3.25 ~ 4.50	1.00 ~ 2.00	11.50 ~ 12.50	≤0.030	≤0.040	0.030	0.030	

① GB/T 9941—1988 为高速工具钢钢板标准, GB/T 9942—1988 为高速工具钢锻件及大型锻材标准, GB/T 9943—1988 为高速工具钢棒材标准。

② 为已废止的冶金部颁布的高速工具钢标准, 目前各工厂企业仍有选用此项标准中的钢号, 录出以供参考。

③ 为粉末冶金高速钢牌号。

表 16-6 高速工具钢的性能特点与用途

钢 号	使 用 性 能	用 途 举 例
W18Cr4V	钨系通用性高速钢, 具有较高的硬度、热硬性及高温硬度, 淬火不易过热, 易于磨削加工; 缺点是热塑性低、韧性稍差。该钢种曾经用量最大, 但 20 世纪 70 年代后使用减少	主要用于制作高速切削的车刀、钻头、铣刀、铰刀等刀具, 还用作板牙、丝锥、扩孔钻、拉丝模、锯片等
W18Cr4VCo5	钨系含钴型高速钢, 为 W18Cr4V 的高性能品级, 具有较高的热硬性及高温硬度, 但韧性较 W18Cr4V 有所降低	用于制作高速机床刀具和要求耐热并承受一定动载荷的刀具
W18Cr4V2Co8	钨系含钴型高速钢, 其热硬性、高温硬度和耐磨性比 W18Cr4VCo5 高, 但韧性降低	适于制作复杂条件下工作的车刀, 铣刀、滚刀等刀具, 供作对较高强度材料的切削加工
W12Cr4V5Co5	钨系高钒含钴高速钢, 引自美国的 T15, 曾称为“王牌钢”, 具有较高的硬度超高耐磨性, 但可磨削性能差, 强度与韧性较差, 不宜制作用于高速切削的复杂刀具	适于制作要求特殊耐磨的切削刀具, 如螺纹梳刀、车刀、铣刀、刮刀、滚刀及成形刀具、齿轮刀具等; 还可用于冷作模具

(续)

钢 号	使 用 性 能	用 途 举 例
W6Mo5Cr4V2	W-Mo 系通用型高速钢，是当今各国用量最大的高速钢钢号（即 M2），具有较高的硬度，热硬性及高温硬度，热塑性好，强度和韧性优良；缺点是钢的过热与脱碳敏感性较大	用于制作要求耐磨性和韧性配合良好的并承受冲击力较大的刀具和一般刀具，如插齿刀、锥齿刨刀、铣刀、车刀、丝锥、钻头；还用作高载荷下耐磨性好的工具，如冷作模具等
CW6Mo5Cr4V2	高碳 W-Mo 系通用型高速钢，由于碳含量提高，淬火后的表面硬度也提高，而且高温硬度、耐磨性和耐热性都比 W6Mo5Cr4V2 高，但强度和韧性有所降低	适于制作要求切削性能优良的刀具
W6Mo5Cr4V3 CW6Mo5Cr4V3	高碳高钒型高速钢，其耐磨性优于 W6Mo5Cr4V2，但可磨削性能也变差，脱碳敏感性较大	用于制作要求特别耐磨的工具和一般刀具，如拉刀、滚刀、螺纹梳刀、车刀、刨刀、丝锥、钻头。由于钢的磨削性差，制作复杂刀具，需用特殊砂轮加工
W2Mo9Cr4V2	低钨高钼型钢种，相当于美国的 M7，具有较高的热硬性和韧性，耐磨性好，但脱碳敏感性较大	主要用于制作螺纹工具，如丝锥、板牙等；还用作钻头、铣刀及各种车削刀具、各种冷冲模具等
W6Mo5Cr4V2Co5	W-Mo 系一般含钴高速钢，其热硬性、耐磨性均比 W6Mo5Cr4V2 高，故切削性能好，但钢的韧性和强度较差，脱碳敏感性较大	用于制作高速切削机床的刀具和要求耐高温并有一定振动载荷的刀具
W2Mo9Cr4VCo8	W-Mo 系高碳含钴超硬型钢种，相当于美国的 M42，是一种用量最大的超硬型高速钢钢号，其硬度可达 66~70HRC，具有高的热硬性和高温硬度，易磨削加工，但韧性较差	用于制作各种复杂的高精度刀具，如精密拉刀、成形铣刀、专用车刀、钻头以及各种高硬度刀具，可用于对难加工材料如钛合金、高温合金、超高强度钢等的切削加工
W9Mo3Cr4V	我国研制的新型 W-Mo 系通用型高速钢，使用性能与 W18Cr4V (T1) 和 W6Mo5Cr4V2 (M2) 相当，但综合工艺性能优于 T1 和 M2，钢的合金成本也较低	可代替 W18Cr4V 和 W6Mo5Cr4V2 制作各种工具
W6Mo5Cr4V2Al	我国研制的 W-Mo 系无钴超硬型高速钢（简称 M2Al 或 501），具有高的硬度、热硬性及高温硬度，切削性能优良，耐磨性和热塑性较好，其韧性优于含钴高速钢，但可磨削性能稍差，钢的过热和脱碳敏感性较大	用于制作各种拉刀、插齿刀、齿轮滚刀、铣刀、刨刀、镗刀、车刀、钻头、钻头等切削刀具。刀具使用寿命长，切削一般材料时，其使用寿命为 W18Cr4V 的两倍，切削难加工材料时，接近含钴高速钢的使用寿命

表 16-7 合金工具钢的临界点

钢 号	$Ac_1/^\circ\text{C}$	$Ac_3 (Ac_{cm})/^\circ\text{C}$	$Ar_1/^\circ\text{C}$	$Ar_3/^\circ\text{C}$	$M_s/^\circ\text{C}$
9SiCr	770	(870)	730		160
Cr06	730	(950)	700	740	
Cr2	745	(900)	700		240
9Cr2	730	(860)	700		270
W	740	(820)	710		
4CrW2Si	780	840			315
5CrW2Si	775	860			295
6CrW2Si	775	810			280
Cr12	810	(835)	755	770	180
Cr12MoV	830	(855)	750	785	230
9Mn2V	730	(760)	655	690	125
CrWMn	750	(940)	710		260
9CrWMn	750	(900)	700		205
Cr4W2MoV	795	(900)	760		142
6W6Mo5Cr4V	820		730		240
5CrMnMo	710	760	650		220
5CrNiMo	730	780	610	640	230
3Cr2W8V	800	(850)	690	750	380
8Cr3	785	830	750	770	370
4Cr5MoVSi	853	912	720	773	310
4Cr5W2VSi	800	875	730	840	275
6Cr4Mo3Ni2WV	737	822	650		180
7Cr4W3Mo2VNb	820		750		220
4Cr5MoV1Si	860	915	775	815	340
5Cr4W5Mo2V	836	893	744	816	

表 16-8 高速钢的临界点及密度

钢 号	$Ac_1/^\circ\text{C}$	密度 $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	钢 号	$Ac_1/^\circ\text{C}$	密度 $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
W18Cr4V	830 ~ 870	8.7	W2Mo9Cr4V2	825 ~ 857	7.92
W6Mo5Cr4V	850 ~ 885	8.16	W6Mo5Cr4V3	834 ~ 840	8.16
W14Cr4VMnRE	795 ~ 860	8.4	W6Mo5Cr4V2Co5	823 ~ 852	8.16
9W18Cr4V	810 ~ 845	8.7	W12Cr4V5Co5	841 ~ 873	8.34
W6Mo5Cr4V2Al	835 ~ 885	8.2	W10Mo4Cr4V3Co10	841 ~ 880	8.43
W10Mo4Cr4V3Al	830 ~ 860	8.3	W12Mo3Cr4V3N	876 ~ 915	7.9
W12Mo3Cr4V3Co5Si	835 ~ 860	8.5			

表 16-9 各种工具对材料性能的基本要求

工具种类	主要性能	工具种类	主要性能
一般切削工具	硬度、耐磨性	冷轧工具	耐磨性、硬度
高速切削工具	热硬性、耐磨性	拉丝模具	耐磨性、不变形性
量具	耐磨性、不变形性	热锻模具	硬度、耐冲击性、耐热疲劳性
冷冲模具	硬度、耐磨性、耐冲击性	热挤压模具	耐磨性、热硬性、耐热疲劳性
冷锻模具	硬度、耐磨性、耐冲击性	金属压铸模具	耐冲蚀性、耐热疲劳性

表 16-10 工具钢的性能比较

钢 号		使用硬度 HRC	可加工	耐磨性	耐冲击性	淬火不变形性	淬硬深度	热硬性	可加工性	脱碳敏感性
碳素工具钢	T7、T8	54 ~ 60	差	差	较好	较差	浅	差	好	大
	T9 ~ T13	56 ~ 65	较差	较差	中等	较差	浅	差	好	大
量具刃具用钢	9SiCr	58 ~ 62	较差	中等	中等	较差	浅	较差	较好	大
	CrWMn	58 ~ 62	中等	中等	中等	中等	浅	较差	中等	较大
	Cr2	58 ~ 62	中等	中等	中等	中等	浅	较差	较好	较大
	CrW5	58 ~ 64	中等	较好	中等	中等	中	中等	中等	中等
冷作模具用钢	Cr12	58 ~ 64	较好	好	差	好	深	较好	较差	较小
	Cr12MoV	55 ~ 63	较好	好	差	好	深	较好	较差	较小
	9Mn2V	58 ~ 62	较差	中等	中等	好	浅	差	较好	较大
	Cr6WV	58 ~ 62	中等	较好	较差	中等	深	中等	中等	中等
	9CrWMn	57 ~ 62	中等	中等	中等	中等	浅	较差	中等	较大
	Cr4W2MoV	58 ~ 62	中等	较好	较差	中等	深	中等	中等	中等
	6W6Mo5Cr4V	55 ~ 60	较差	较好	较好	中等	深	中等	中等	中等
	Cr2Mn2SiWMoV	58 ~ 62	中等	较好	较差	较好	深	中等	中等	中等
热作模具用钢	5CrMnMo	30 ~ 47	差	中等	中等	中等	中	较差	较好	较大
	5CrNiMo	30 ~ 47	差	中等	较好	中等	中	较差	较好	较大
	3Cr2W8V	45 ~ 54	较差	较好	中等	较好	深	较好	较差	较小
	4Cr5MoSiV	40 ~ 54	差	较好	中等	较好	深	较差	较好	中等
	35Cr3Mo3W2V	44 ~ 54	差	较好	中等	较好	深	较好	较好	中等
	3Cr3Mo3V	40 ~ 54	差	较好	中等	较好	深	较好	较好	中等
	4Cr3W4Mo2VTiNb	48 ~ 56	较差	较好	中等	较好	深	较好	较好	中等
	5Cr4W5Mo2V	50 ~ 56	较差	较好	较差	中等	深	较好	较好	中等

(续)

钢 号		使用硬度 HRC	可加工性	耐磨性	耐冲击性	淬火不 畸变性	淬硬 深度	热硬性	切削性	脱 碳 敏感性
高 速 工 具 钢	W18Cr4V	60 ~ 65	好	较好	较差	中等	深	好	较差	小
	W12Cr4V4Mo	61 ~ 66	好	好	差	中等	深	好	差	小
	W6Mo5Cr4V2	60 ~ 65	好	较好	中等	中等	深	好	较差	中等
	W6Mo5Cr4V3	61 ~ 66	好	好	差	中等	深	好	差	较小
	W7Mo4Cr4V2Co5	65 ~ 70	好	好	较差	中等	深	好	较差	较小
	W2Mo9Cr4VCo8	65 ~ 70	好	好	较差	中等	深	好	较差	中等
	W6Mo5Cr4V2Al	67 ~ 69	好	好	较差	中等	深	好	较差	较小
	W10Mo4Cr4V3Al	67 ~ 69	好	好	较差	中等	深	好	差	较小

注：性能递变顺序为好 > 较好 > 中等 > 较差 > 差。

16.2 工具的热处理

1. 碳素工具钢热处理工艺及性能

(1) 热处理工艺 (表 16-11 ~ 表 16-15, 图 16-1)

表 16-11 碳素工具钢的退火规范

钢号	加 热 规 范		冷 却 规 范			硬 度 HBW
	温 度 /℃	保温时间 /h	缓 冷	等 温		
				温度/℃	保温时间/h	
T7	740 ~ 750	4 ~ 2	以 < 30℃/h 炉冷到 500 ~ 600℃ 出炉	650 ~ 680	6 ~ 4h, 等温后炉冷到 500 ~ 600℃ 出炉	≤ 187
T8	740 ~ 750			650 ~ 680		≤ 187
T9	740 ~ 750			650 ~ 680		≤ 192
T10	750 ~ 760			680 ~ 700		≤ 197
T11	750 ~ 760			680 ~ 700		≤ 207
T12	760 ~ 770			680 ~ 700		≤ 207
T13	760 ~ 770			680 ~ 700		≤ 217

表 16-12 碳素工具钢的正火规范

钢号	加热温度/℃	保温时间/s·mm ⁻¹	冷 却 方 式	硬度 HBW
T7	800 ~ 820	盐 浴 炉 20 ~ 25	视工件尺寸大小可采取空冷、 空气吹冷, 硝盐(400℃左右)冷 却、油冷	241 ~ 302
T8	760 ~ 780			241 ~ 302
T9	780 ~ 800			241 ~ 302
T10	830 ~ 850	空 气 炉 50 ~ 80		255 ~ 329
T11	840 ~ 860			255 ~ 329
T12	850 ~ 870			269 ~ 341
T13	860 ~ 880			269 ~ 341

表 16-13 高碳工具钢的调质规范

钢号	淬 火		回 火		球化级别	硬度 HBW
	加热温度/℃	冷却介质	温度/℃	时间/h		
T10	780 ~ 800	油	640 ~ 680	2 ~ 3	3 ~ 5	183 ~ 207
T11	790 ~ 810	油	640 ~ 680	2 ~ 3	3 ~ 5	183 ~ 207
T12	800 ~ 820	油	640 ~ 680	2 ~ 3	3 ~ 5	183 ~ 207
T13	810 ~ 830	油	640 ~ 680	2 ~ 3	3 ~ 5	197 ~ 217

表 16-14 碳素工具钢的淬火回火规范

钢号	淬 火			回 火		
	加热温度 ^① /℃	冷却介质	硬度 HRC	加热温度/℃	保温时间/h	硬度 ^② HRC
T7	780 ~ 800	盐或碱的水溶液	62 ~ 64	140 ~ 160	1 ~ 2	62 ~ 64
				160 ~ 180		58 ~ 61
	800 ~ 820	油或熔盐	59 ~ 61	180 ~ 200		56 ~ 60
T8	760 ~ 770	盐或碱的水溶液	63 ~ 65	140 ~ 160	1 ~ 2	60 ~ 62
				160 ~ 180		58 ~ 61
	780 ~ 790	油或熔盐	60 ~ 62	180 ~ 200		56 ~ 60
T9	760 ~ 770	盐或碱的水溶液	63 ~ 65	140 ~ 160	1 ~ 2	61 ~ 63
				160 ~ 180		59 ~ 62
	780 ~ 790	油或熔盐	60 ~ 62	180 ~ 200		57 ~ 60
T10	770 ~ 790	盐或碱的水溶液	63 ~ 65	140 ~ 160	1 ~ 2	62 ~ 64
				160 ~ 180		60 ~ 62
	790 ~ 810	油或熔盐	61 ~ 62	180 ~ 200		59 ~ 61
T11	770 ~ 790	盐或碱的水溶液	63 ~ 65	140 ~ 160	1 ~ 2	62 ~ 64
				160 ~ 180		61 ~ 63
	790 ~ 810	油或熔盐	61 ~ 62	180 ~ 200		60 ~ 62
T12	770 ~ 790	盐或碱的水溶液	63 ~ 65	140 ~ 160	1 ~ 2	62 ~ 64
				160 ~ 180		61 ~ 63
	790 ~ 810	油或熔盐	61 ~ 62	180 ~ 200		60 ~ 62
T13	770 ~ 790	盐或碱的水溶液	63 ~ 65	140 ~ 160	1 ~ 2	62 ~ 64
				160 ~ 180		61 ~ 63
	790 ~ 810	油或熔盐	62 ~ 64	180 ~ 200		60 ~ 62

① 加热系数：空气炉为 50 ~ 80s/mm，盐浴炉为 20 ~ 25s/mm。

② 在盐或碱水溶液中淬冷并经相应温度回火的硬度。

表 16-15 碳素工具钢的淬火冷却方法

冷却方法	常用冷却介质(质量分数)	介质温度/℃	停留时间	适用范围
单液淬火	水溶液: NaOH40% ~ 50% NaOH(或 NaCl)5% ~ 10%	≤ 40	1s/(3 ~ 5mm)	> 12mm 形状简单
	L-AN15 或 L-AN32 全损耗系统用油 (10 号或 20 号机油)	20 ~ 120	冷至 150℃ 以下	< 5mm
双介质淬火	水溶液-油		1s/(4 ~ 7mm)	> 12mm 形状较复杂
	水溶液-硝盐(或碱浴)		1s/(3 ~ 6mm)	> 12mm 形状较复杂
马氏体分级淬火	KNO ₃ 50% + NaNO ₂ 50%	150 ~ 200	2 ~ 10min	≤ 12mm 形状较复杂
	KOH 85% + NaNO ₂ 15% 以及总重量 3% 的水	150 ~ 180	2 ~ 10min	≤ 25mm 形状较复杂
贝氏体等温淬火	硝盐	150 ~ 200	20 ~ 60min	≤ 12mm 形状复杂
	碱浴	150 ~ 180	20 ~ 60min	≤ 25mm 形状复杂

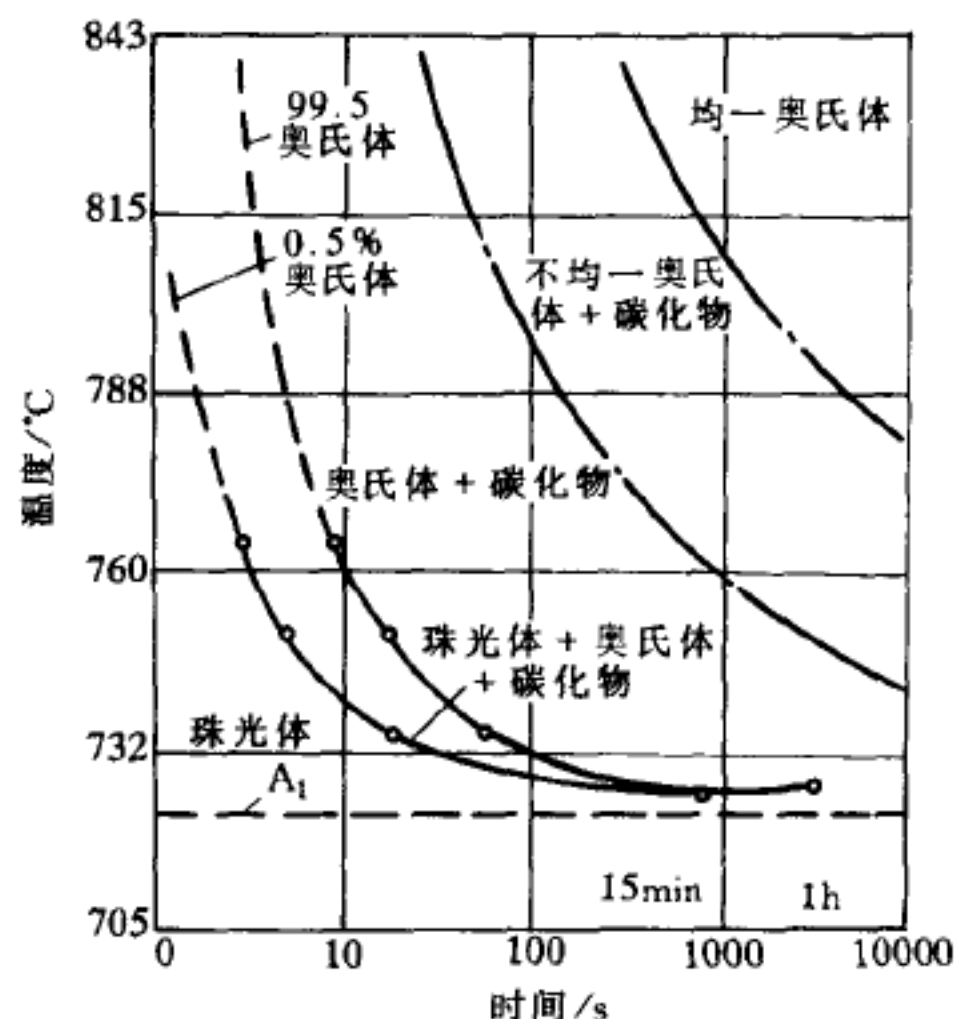


图 16-1 淬火温度和保温时间对 T8 钢组织转变的影响

(2) 力学性能(图 16-2 和图 16-3)

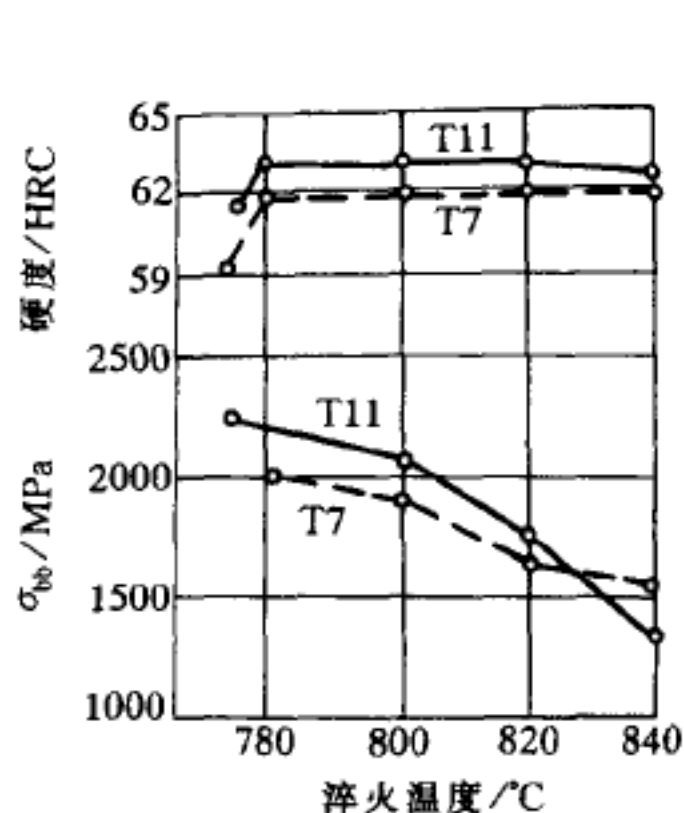


图 16-2 T7、T11 钢的强度、硬度与淬火温度的关系(水淬, 150℃ 回火 1h)

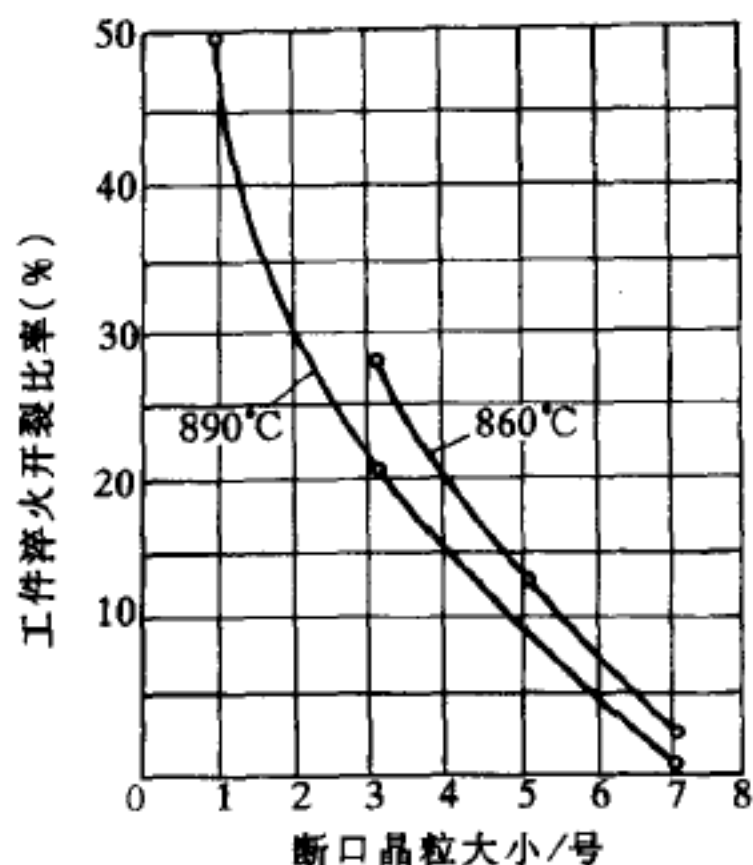


图 16-3 两种奥氏体化温度下, 碳素钢工具断口晶粒大小对淬火开裂倾向的影响

2. 合金工具钢热处理工艺和性能

(1) 热处理工艺(表 16-16 ~ 表 16-19)

表 16-16 常用合金工具钢球化退火规范

钢 号	加 热 规 范		冷 却 规 范			硬 度 HBW
	温 度 /℃	保温时间 /h	缓 冷	等 温		
				温度/℃	保温时间/h	
9SiCr	790 ~ 810	4 ~ 2	以 30℃/h 炉冷到 500 ~ 600℃ 出炉	700 ~ 720	6 ~ 4h, 等温后炉冷 到 500 ~ 600℃ 出炉	179 ~ 241
CrWMn	770 ~ 790			680 ~ 700		207 ~ 255
CrMn	780 ~ 800			700 ~ 720		197 ~ 241
Cr2	770 ~ 790			680 ~ 700		179 ~ 229
9Mn2V	750 ~ 770			670 ~ 690		≤ 229
GCr6	780 ~ 800			700 ~ 720		179 ~ 207
GCr15	780 ~ 800			700 ~ 720		179 ~ 207
CrW5	800 ~ 820			680 ~ 700		229 ~ 285
Cr6WV	830 ~ 850			720 ~ 740		≤ 235
Cr12	850 ~ 870			730 ~ 750		217 ~ 269
Cr12MoV	850 ~ 870			730 ~ 750		207 ~ 255

表 16-17 常用合金工具钢的正火规范

钢 号	加热温度/℃	保温时间/s·mm ⁻¹	冷 却	硬 度 HBW
Cr2	930 ~ 950	盐浴炉 25 ~ 30 空气炉 70 ~ 90	空 冷	302 ~ 388
9SiCr	900 ~ 920			321 ~ 415
CrMn	900 ~ 920			321 ~ 415
CrWMn	970 ~ 990			388 ~ 514
GCr6	900 ~ 950			270 ~ 390
GCr15	900 ~ 950			270 ~ 390

表 16-18 合金工具钢的淬火回火规范

钢 号	淬火温度/℃	冷却介质	淬火硬度 HRC	回火温度/℃	回火硬度 HRC
Cr2	830 ~ 850	油	62 ~ 65	130 ~ 150	62 ~ 65
	840 ~ 860	硝酸盐	61 ~ 63	150 ~ 170	60 ~ 62
9SiCr	850 ~ 870	油, 硝酸盐	62 ~ 65	140 ~ 160	62 ~ 65
				160 ~ 180	61 ~ 63
CrMn	840 ~ 860	水, 油	63 ~ 66	130 ~ 140	62 ~ 65
				160 ~ 180	60 ~ 62
CrWMn	820 ~ 840	油	62 ~ 65	140 ~ 160	62 ~ 65
	830 ~ 850	硝酸盐	62 ~ 64	170 ~ 200	60 ~ 62
SiMn	780 ~ 800	水	62 ~ 65	150 ~ 160	62 ~ 64
	800 ~ 840	油, 硝酸盐			
9Mn2V	780 ~ 800	油, 硝酸盐	≥ 62	150 ~ 200	60 ~ 62

(续)

钢 号	淬火温度/℃	冷却介质	淬火硬度 HRC	回火温度/℃	回火硬度 HRC
CrW5	820 ~ 860	水, 油	64 ~ 66	150 ~ 170	61 ~ 65
				200 ~ 250	60 ~ 64
Cr6WV	950 ~ 970	油	62 ~ 64	150 ~ 170	62 ~ 63
				190 ~ 210	58 ~ 60
	990 ~ 1010	硝酸盐	62 ~ 64	第一次 500 第二次 190 ~ 210	57 ~ 58
Cr12MoV	1000 ~ 1040	油, 硝酸盐	62 ~ 63	150 ~ 170	61 ~ 63
	1115 ~ 1130	油, 硝酸盐	45 ~ 50	200 ~ 275	57 ~ 59
				510 ~ 520 多次	60 ~ 61
GCr6	800 ~ 825	油, 硝酸盐	62 ~ 65	160 ~ 180	≥ 61
	790 ~ 810	水	63 ~ 65		
GCr15	830 ~ 850	油	62 ~ 65	160 ~ 180	≥ 61
	840 ~ 860	硝酸盐	61 ~ 63		

表 16-19 工具钢热处理后的相组成

钢 号	相 组 成 ^① (体积分数)(%)			
	淬 火 后		回 火 后	
	碳 化 物	残留奥氏体	碳 化 物	残留奥氏体
T7	—	2 ~ 3	3	2 ~ 3
T8	—	4 ~ 5	4 ~ 5	4 ~ 5
T12	3 ~ 5	5 ~ 8	10 ~ 12	5 ~ 8
CrWMn	4 ~ 6	16 ~ 18	12 ~ 14	16 ~ 18
Cr12Mo	8 ~ 9	18 ~ 20	15 ~ 16	18 ~ 20
W18Cr4V	16 ~ 19	22 ~ 25	22 ~ 24	< 1
W6Mo5Cr4V2	14 ~ 16	20 ~ 22	20 ~ 22	1

① 基体为马氏体。

(2) 力学性能

1) 9SiCr (图 16-4 ~ 图 16-16)

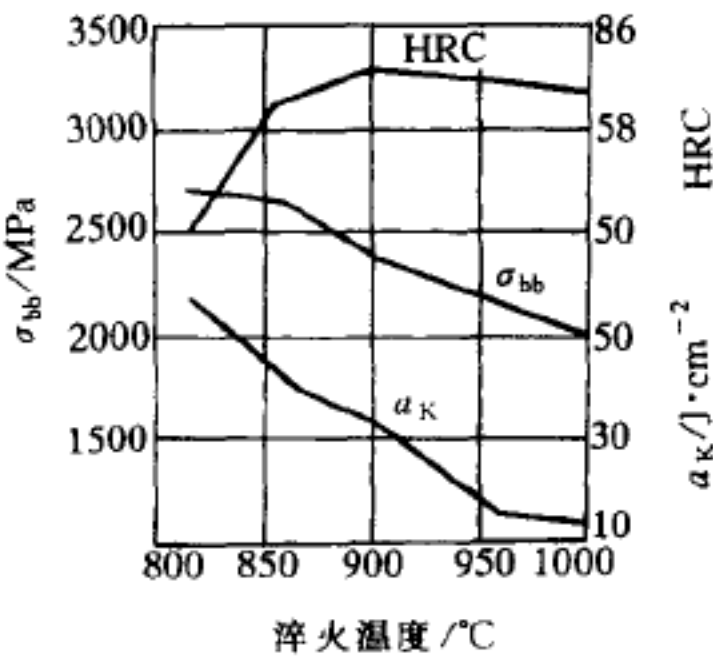


图 16-4 经不同温度
淬火并在 160℃ 回火
后的力学性能

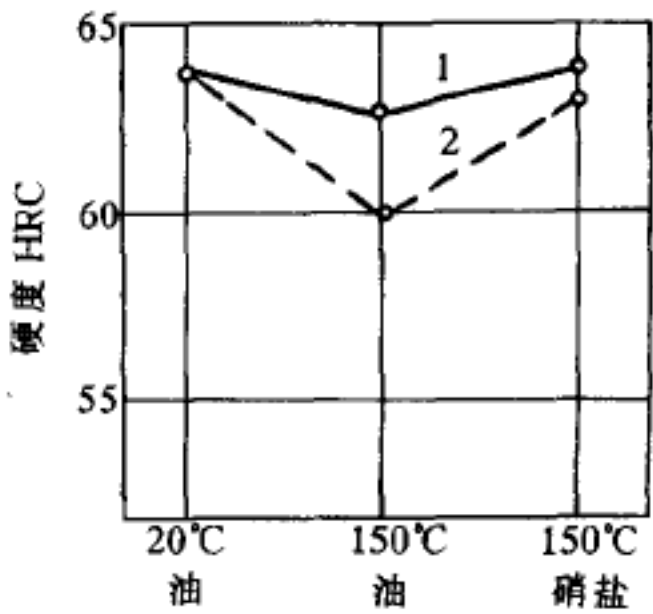


图 16-5 冷却介质对淬火硬度的影响
(860 ~ 980℃ 加热, 在不同温度介质中冷却;
150℃ 介质中停留 3min 后空冷; 1—直径
15mm 2—直径 20mm)

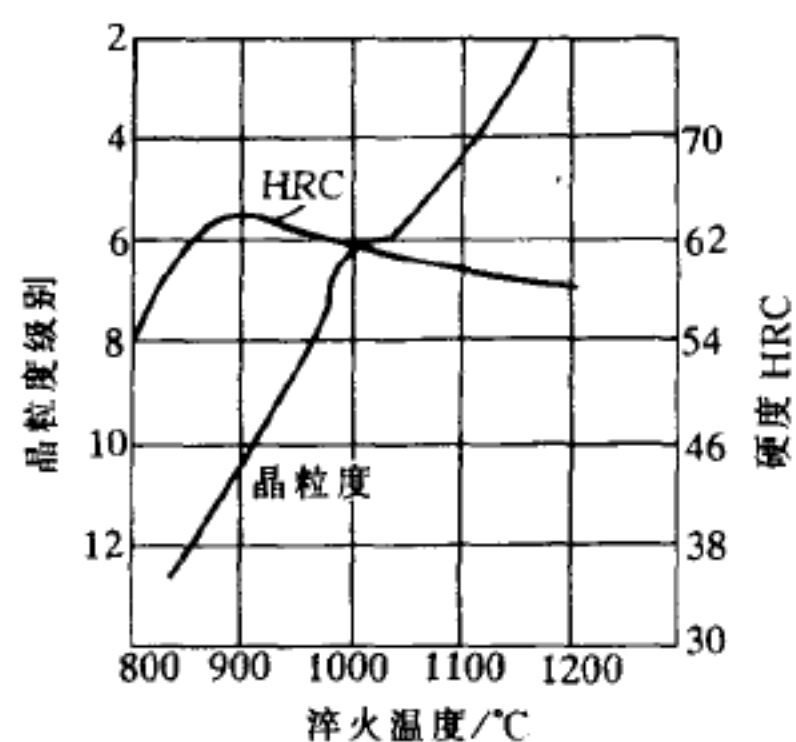


图 16-6 不同温度淬火时晶粒大小及硬度的变化

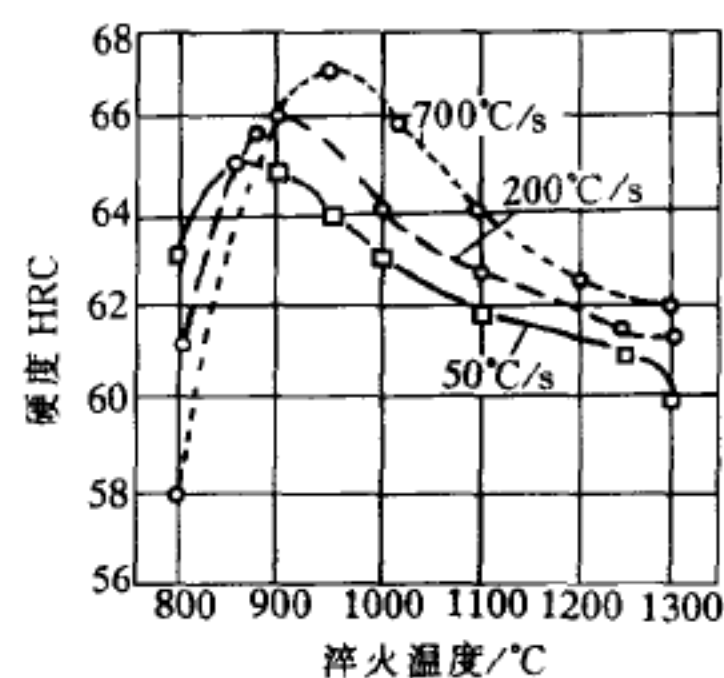


图 16-7 高频感应加热淬火时不同温度淬火的（表面层）硬度变化曲线

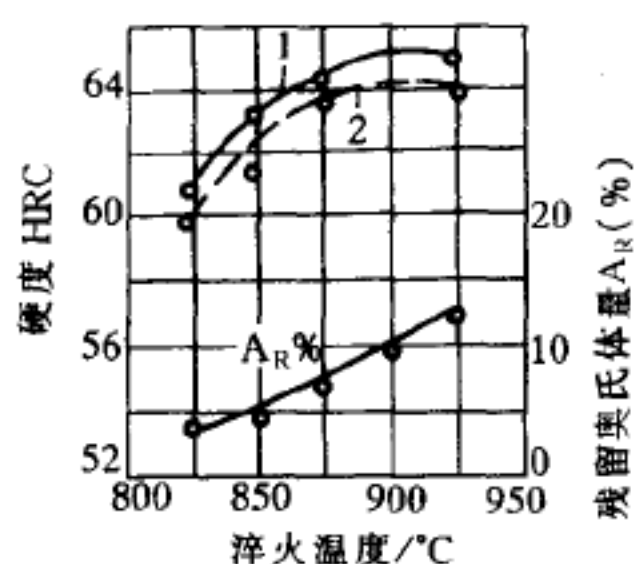


图 16-8 硬度、残留奥氏体量与淬火温度的关系

1—油冷 2—硝酸盐冷

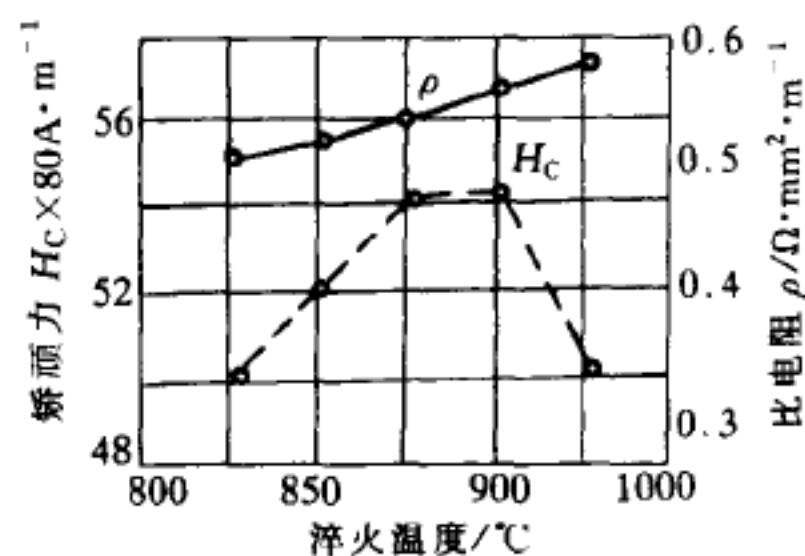


图 16-9 物理性能与淬火温度的关系

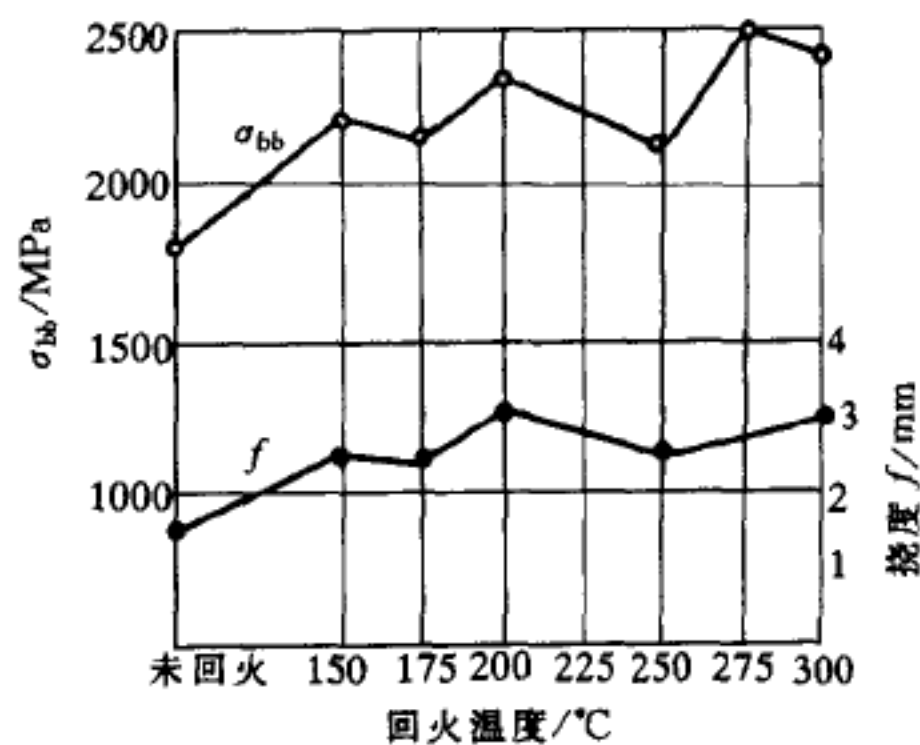


图 16-10 经最佳淬火温度淬火不同温度回火后的力学性能

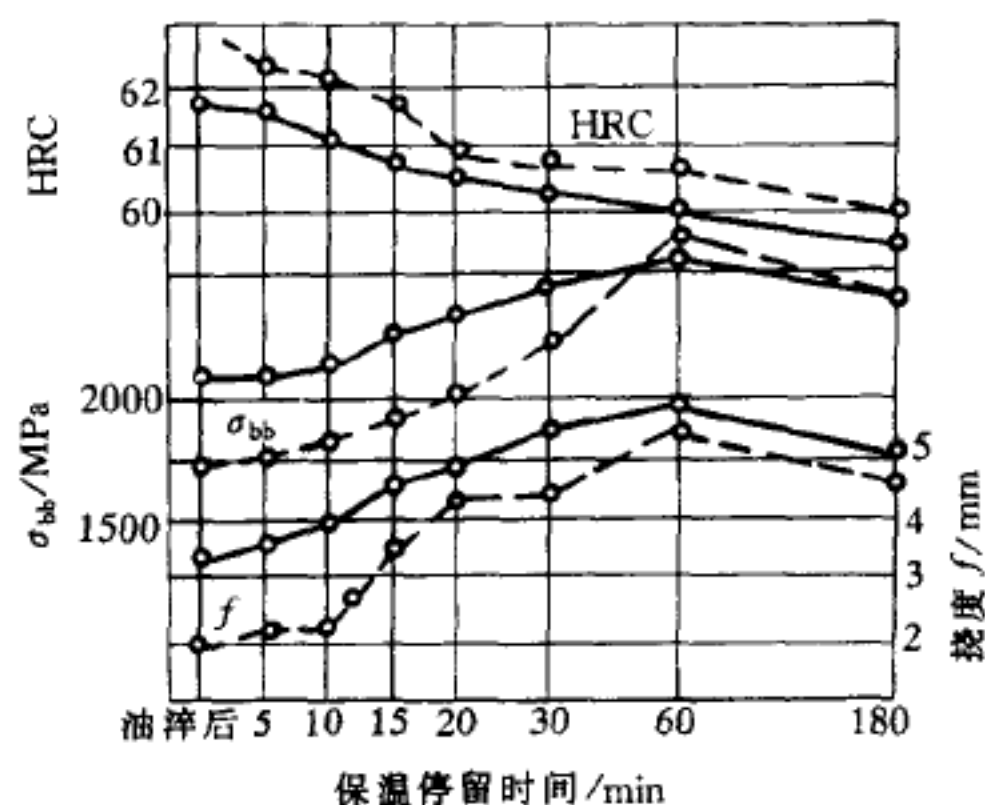


图 16-11 自 875°C 加热后于 160°C 等温停留不同时间后空冷的力学性能（实线）及经 180°C 回火 60min 后的力学性能（虚线）

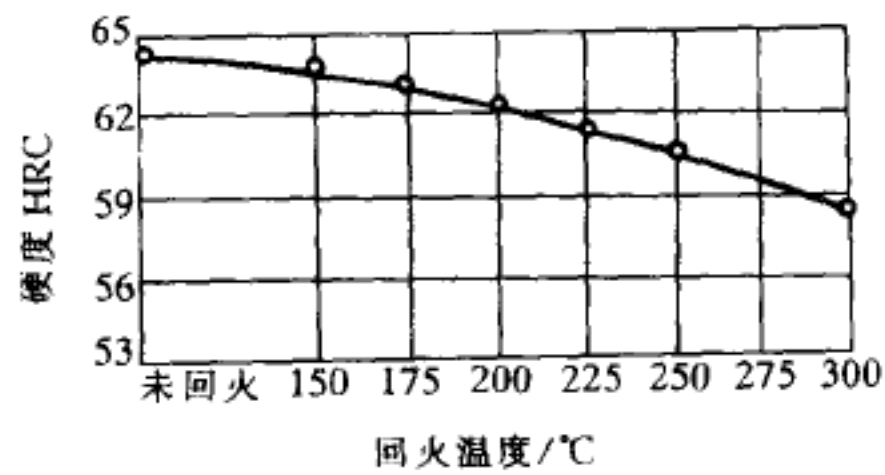


图 16-12 870℃ 淬火后，
在不同温度回火（回火时间
为 1h）的硬度变化

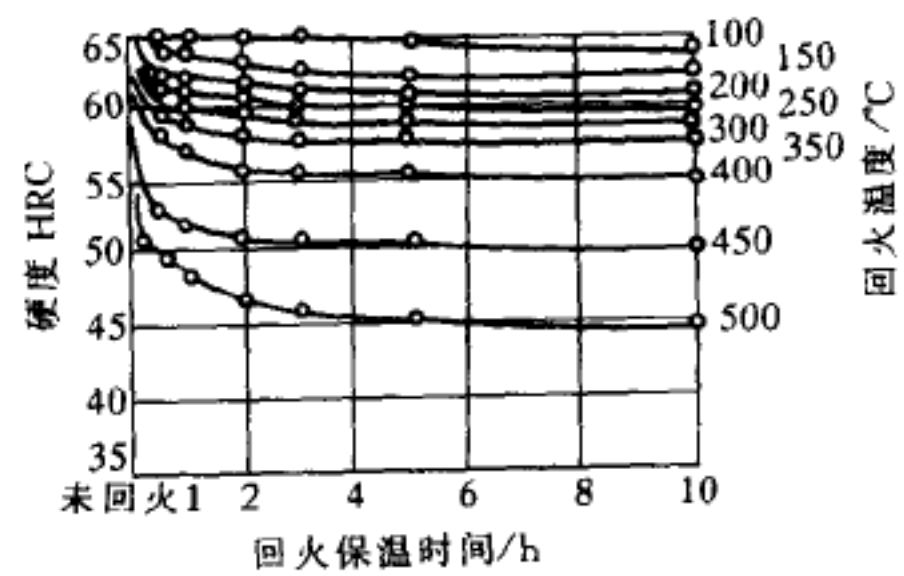


图 16-13 经 870℃ 淬油后，
回火硬度与保温时间的关系

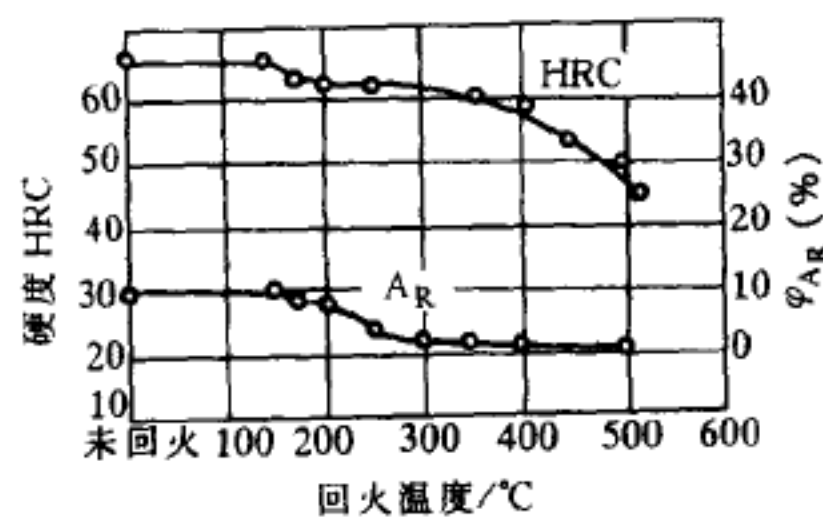


图 16-14 经 870℃ 淬油后在不同
回火温度（保持 1h）时硬度、
残留奥氏体量的变化

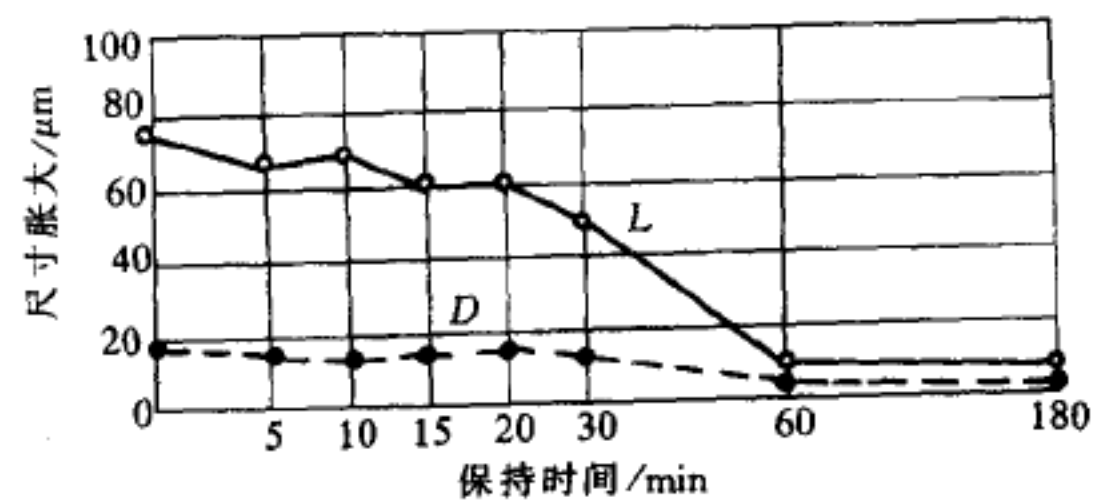


图 16-15 经 870℃ 淬火并在 160℃ 回火时
保持时间对尺寸变化的影响
(试样直径 $D = 15\text{mm}$ ，长度 $L = 50\text{mm}$)

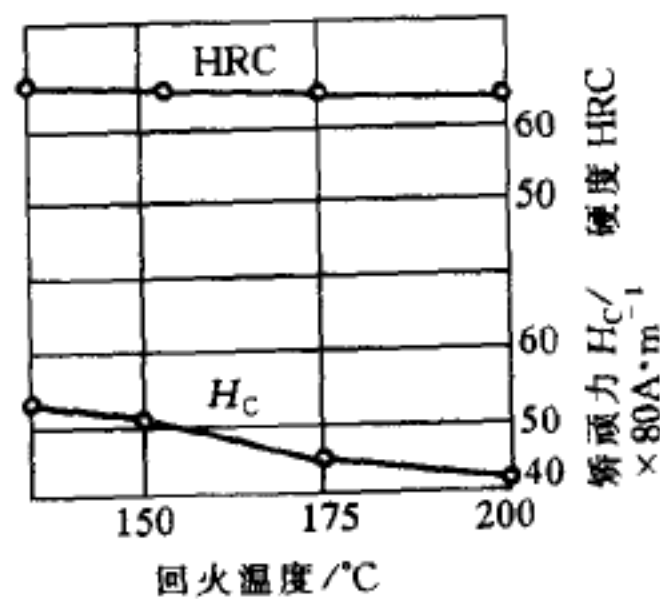


图 16-16 经 875℃ 淬火后，不同回火温度对物理性能的影响

2) Cr06 (图 16-17 ~ 图 16-20)

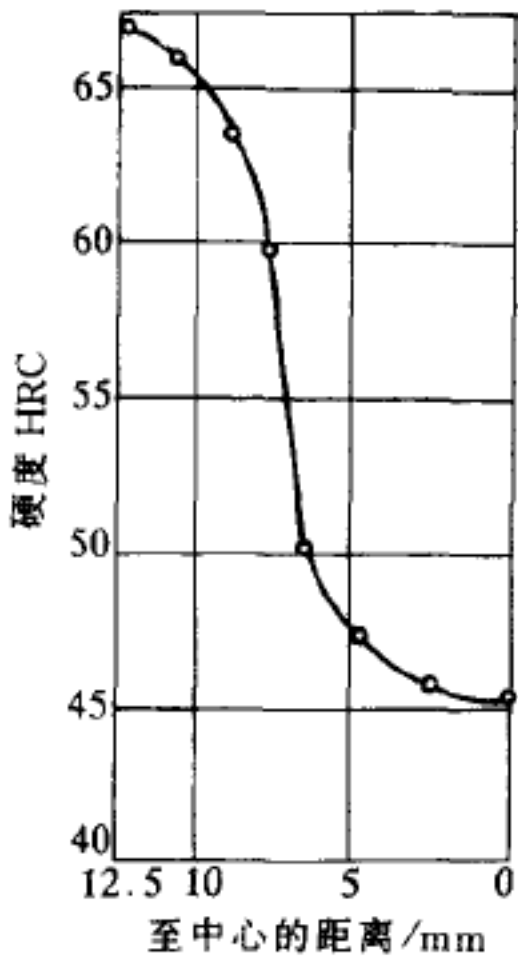


图 16-17 840℃加热盐水中淬火时，沿试样直径方向的硬度变化
($w_C 1.3\%$, $w_{Cr} 0.5\%$)

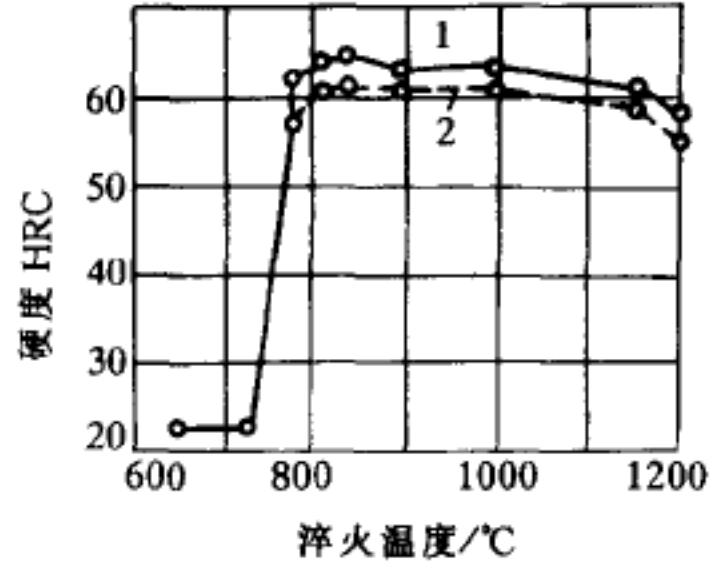


图 16-18 硬度与淬火温度的关系
($\phi 20\text{mm}$ 试样
1—表面硬度 2—距表面)

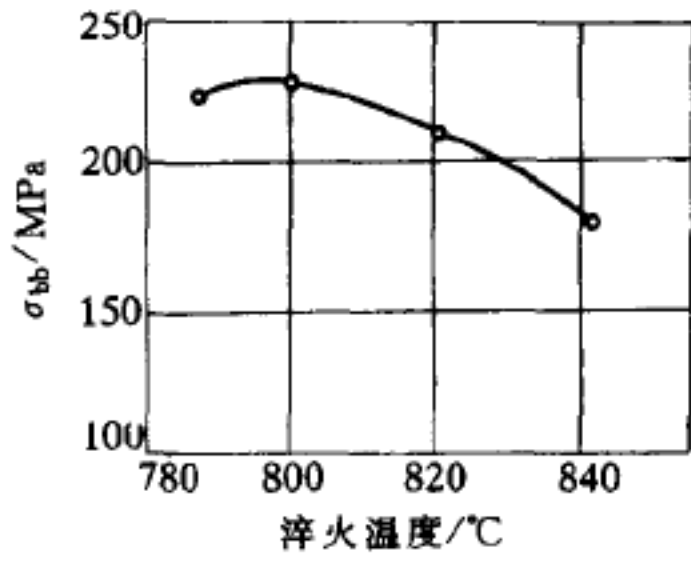


图 16-19 抗弯强度与淬火温度的关系
(水淬后经 150℃回火 1h)

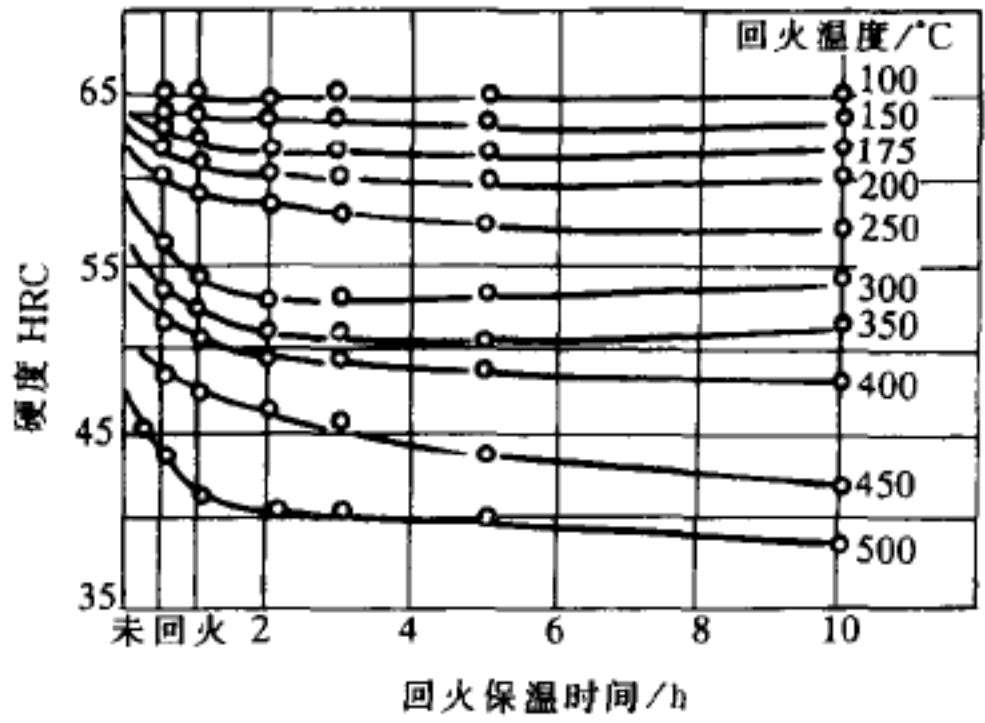


图 16-20 回火硬度与回火温度和保温时间的关系
(810℃油淬)

3) Cr2 (图 16-21 ~ 图 16-30)

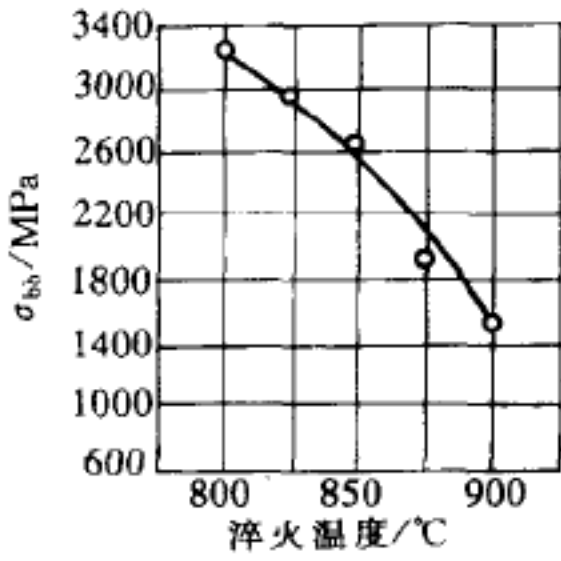


图 16-21 淬火温度对抗弯性能的影响

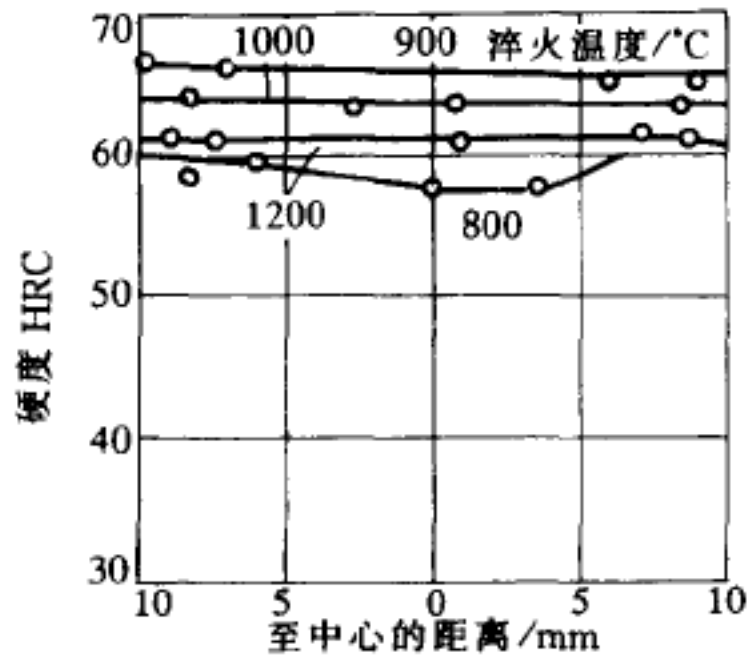


图 16-22 不同温度淬火沿试样直径的硬度分布

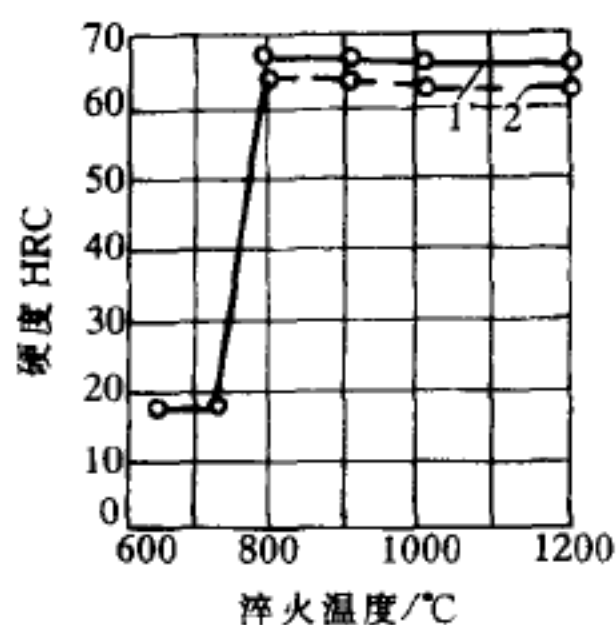


图 16-23 硬度与淬火温度的关系
(1—试样表面硬度 2—试样中心硬度)

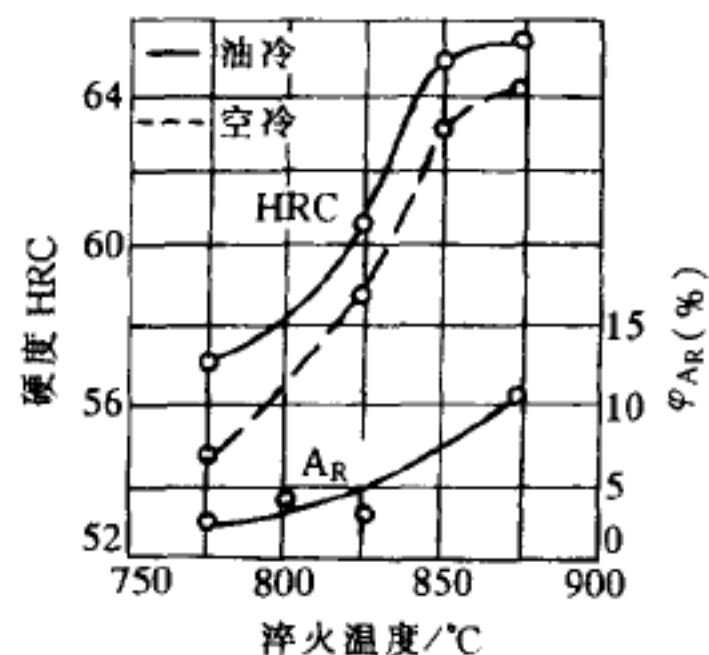


图 16-24 残留奥氏体量及硬度与
淬火温度的关系

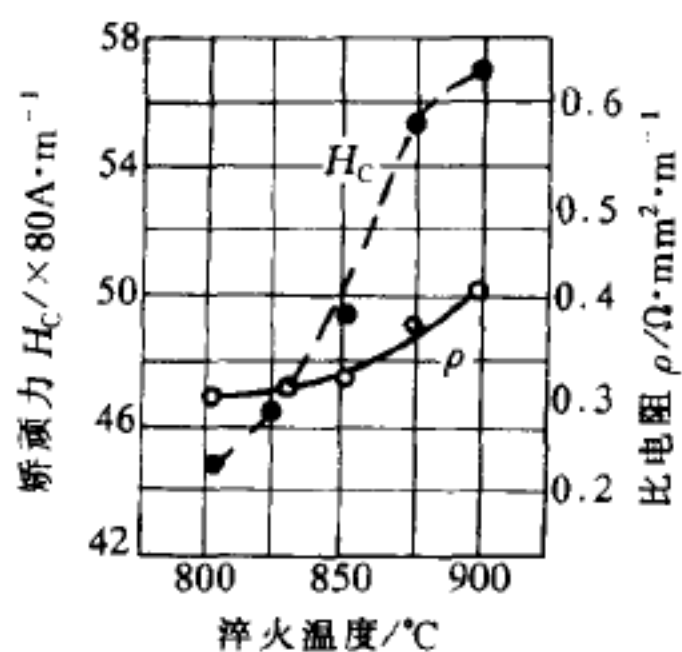


图 16-25 物理性能与淬火温度的关系

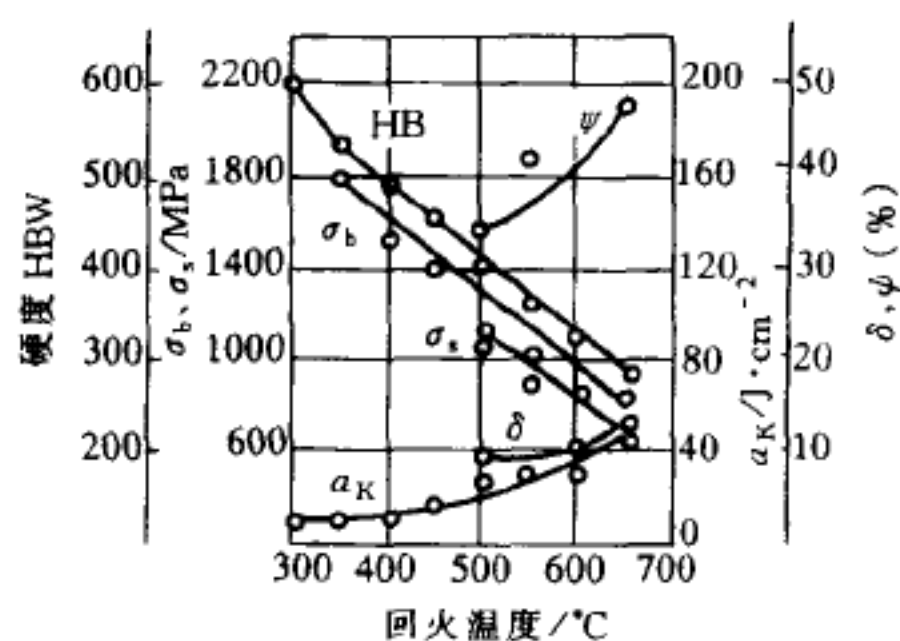


图 16-26 回火温度对力学性能的影响

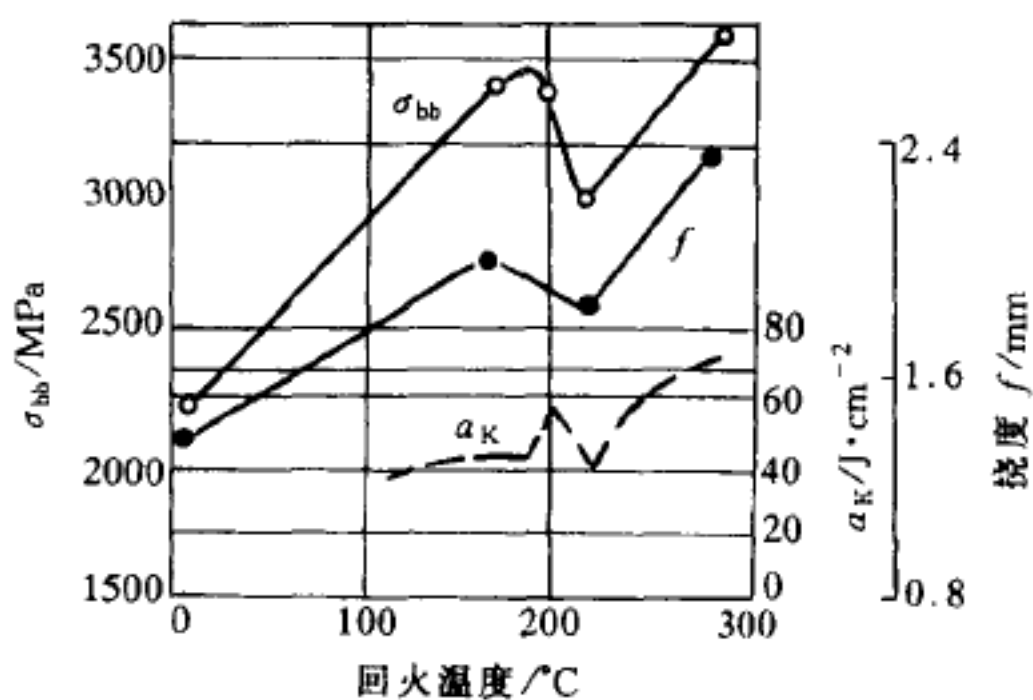


图 16-27 870°C加热硝盐冷却并经不同
温度回火后的力学性能

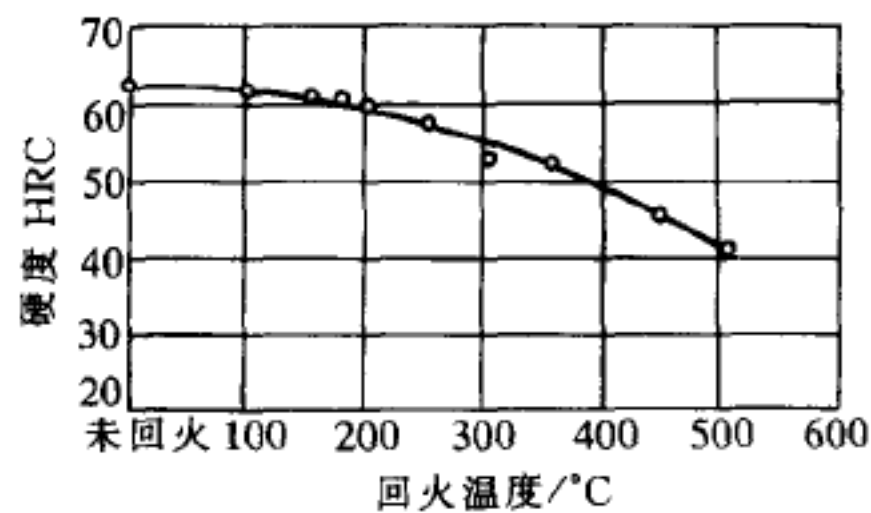


图 16-28 硬度与回火温度的关系
(840°C加热淬油，回火 1h)

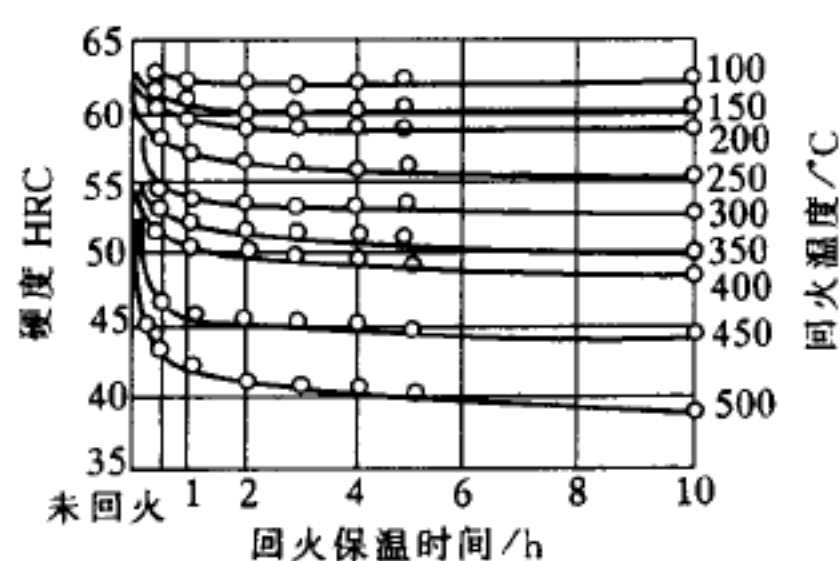


图 16-29 回火硬度与回火温度及保温时间的关系

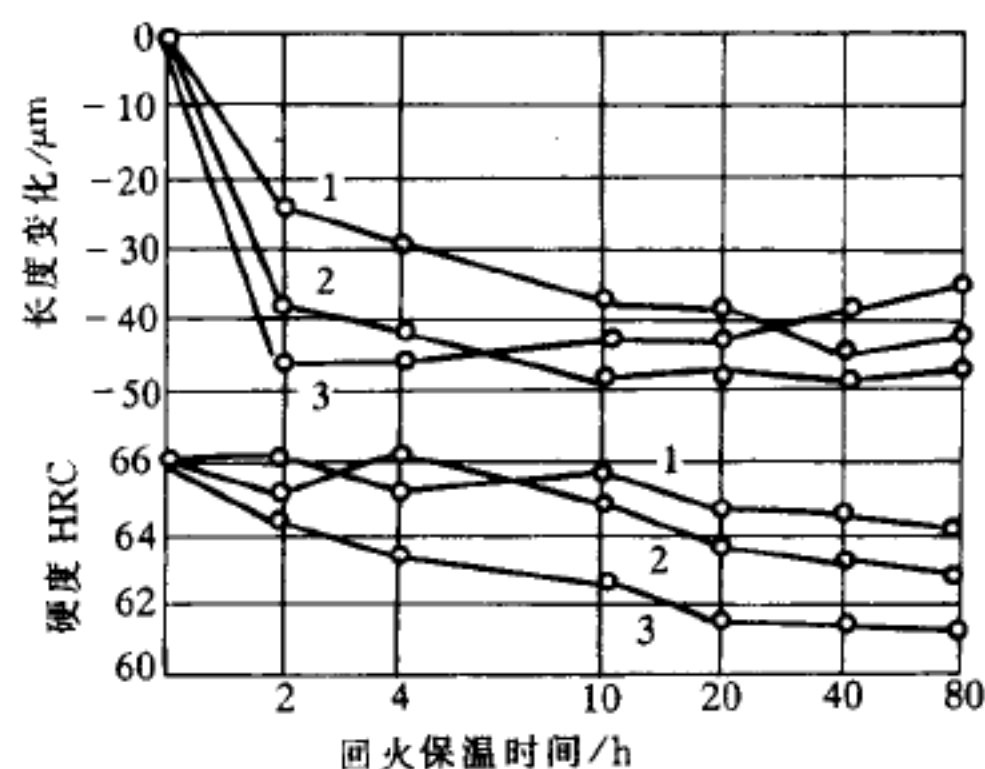


图 16-30 试样长度变化、硬度与回火保温时间的关系

(1—105 ~ 110°C 回火 2—125 ~ 130°C 回火 3—145 ~ 150°C 回火)

4) 9Cr2 (图 16-31)

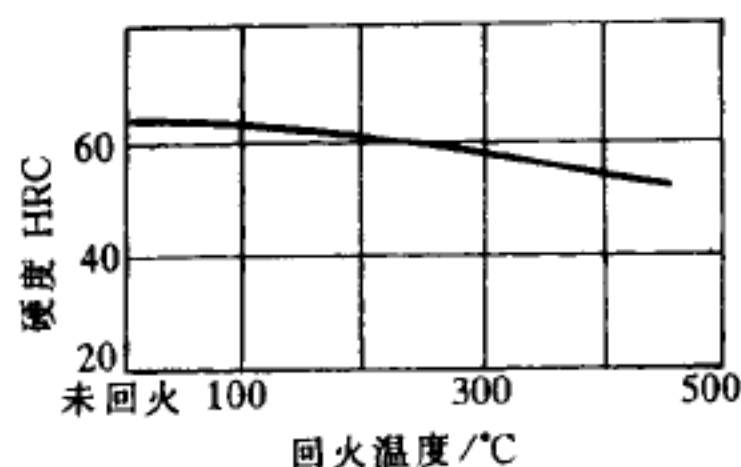


图 16-31 硬度与回火温度的关系 (830°C 加热淬油)

3. 高速钢热处理工艺和性能

(1) 热处理工艺 (图 16-32 ~ 图 16-37, 表 16-20 ~ 表 16-27)

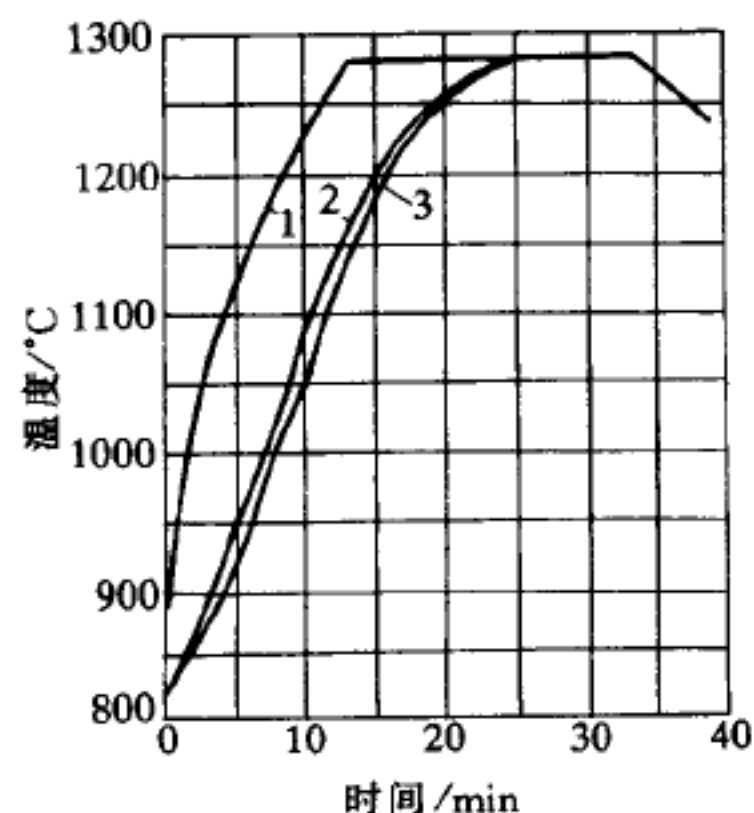


图 16-32 W18Cr4V 高速钢 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 试样经 850°C 预热再加热到 1280°C 过程中表面和心部的升温曲线
1—炉温 2—表面温度 3—心部温度

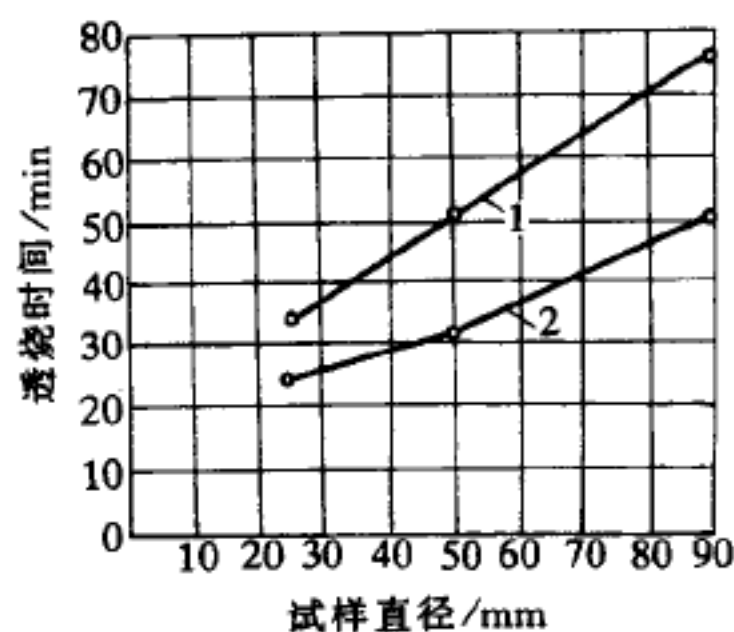


图 16-33 不同直径的高速钢试样的加热时间
1—850°C 预热时的加热时间
2—从 850°C 到 1280°C 时的加热时间

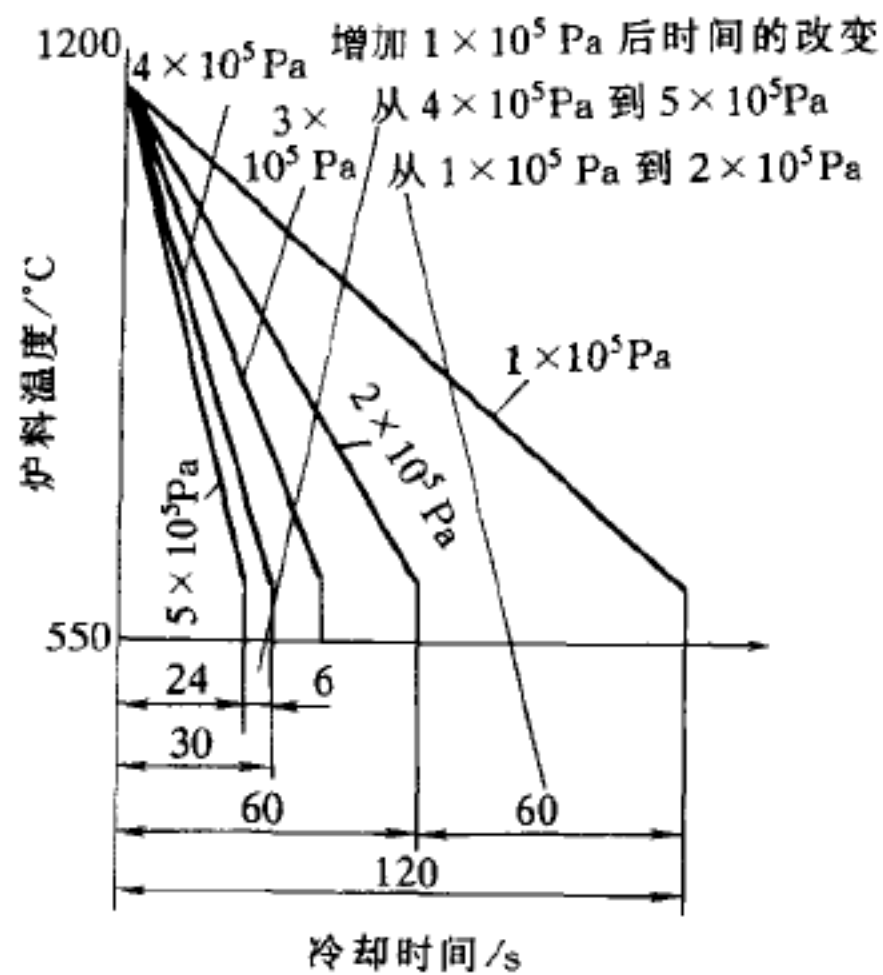


图 16-34 冷却气体压力和淬火速率间的关系曲线

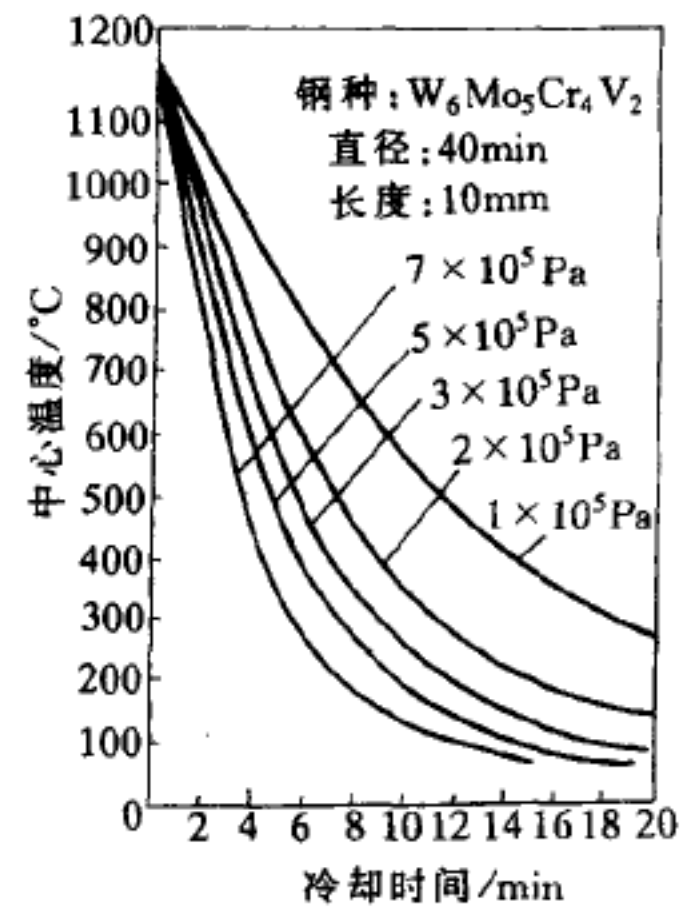


图 16-35 冷却气体压力和冷却时间的关系

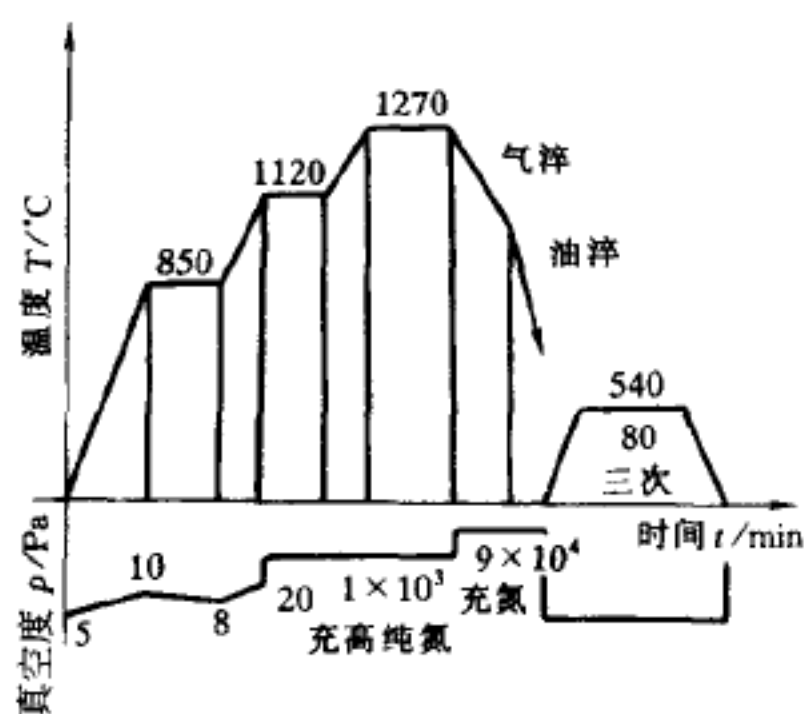


图 16-36 W18Cr4V 钢零件真空淬火工艺曲线

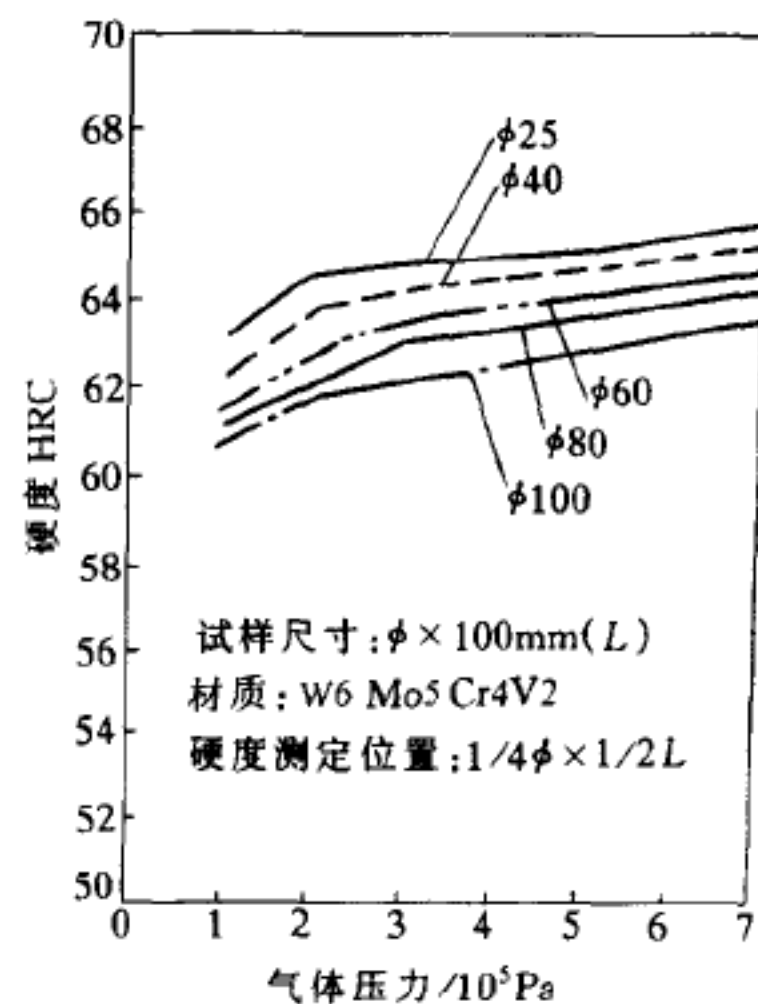


图 16-37 冷却气体压力和不同直径的试样淬火回火后的硬度

表 16-20 改善被切削性的热处理工艺 (预备工艺)

工艺方法	加热温度/°C		加热系数 /s·mm ⁻¹	冷却方法	回火
	W18Cr4V	W6Mo5Cr4V2			
I	850 ~ 870	840 ~ 860	25 ~ 35	空气吹冷或油冷	—
II	880 ~ 890	870 ~ 880	20 ~ 30	720 ~ 730°C 停留 60 ~ 90s 后空冷	—
III	900 ~ 920	880 ~ 900	15 ~ 20	空冷或油冷	620 ~ 700°C 0.5 ~ 2h

表 16-21 高速钢热处理工艺规范

序 号		钢 号		钢锭、钢坯、钢材的退火工艺										淬火和回火工艺						淬火、 回火后 硬度 HRC
				软化退火				等温退火			淬火预热			淬火加热			淬火介质	回火工艺		
				加热温度 /℃	保温 时间 /h	冷 却	硬度 HBW	加热温度 /℃	保温 时间 /h	冷 却	硬度 HBW	温度 /℃	时间/s ·mm ⁻¹	介 质	温度 /℃	时间 /s ·mm ⁻¹				
1		W18Cr4V	860~880	2		≤277	860~880	2	炉 冷 至 740~760℃,	≤255	850	24	1260~1300 1200~1240 ^①	12~15 15~20	油	560℃, 3 次, 每次 1h, 空 冷	≥62			
2		W6Mo5Cr4V2	840~860	2		≤285	840~860	2	保温 2~4h, 再 炉 冷 至 500~600℃, 出炉空冷	≤255	850	24	1200~1220 ^① 1230 ^② 1240 ^③	12~15	油	560℃ 回 火 3 次, 每 次 1h, 空 冷	≥62 ≥63 ≥64			
3		W14Cr4VMnRE	870~890	2		≤277	870~890	2		≤255	850	24	1230~1260	12~15	油	560℃ 回 火 3 次, 每 次 1h, 空 冷	≥60 ≥63			
4		9W18Cr4V	850~870	2		≤285	850~870	2		≤262	850	24	1260~1280	12~15	油	570~590℃, 回 火 4 次, 每 次 1h, 空 冷	≥63			
5		W12Cr4V4Mo	840~860	2		≤285	840~860	2		≤262	850	24	1240~1250 ^① 1260 ^② 1270~1280 ^③	12~15	油	550~570℃, 回 火 3 次, 每 次 1h, 空 冷	≥62			
6		W6Mo5Cr4V2Al	850~870	2		≤285	850~870	2		≤269	850	24	1220~1240	12~15	油	550~570℃, 回 火 4 次, 每 次 1h, 空 冷	≥65			
7		W10Mo4Cr4V3Al	840~860	2		≤285	840~860	2		≤269	860~ 880	40	1230~1250	20	油	540~560℃, 回 火 4 次, 每 次 1h, 空 冷	≥66			
8		W6Mo5Cr4V5Si- NbAl	850~870	2		≤285	850~870	2		≤269	850	24	1220~1240	12~15	油	500~530℃, 回 火 3 次, 每 次 1h, 空 冷 或 560℃ 回 火 3 次, 每 次 1h, 空 冷	≥65			
9		W12Mo3Cr4V3- Co5Si	860~880	2		≤285	860~880	2		≤269	850	24	1210~1240	12~15	油	560℃ 回 火 4 次, 每 次 1h, 空 冷	≥66			
10		W2Mo9Cr4V2	800~850	2		≤277	800~850	2		≤255	800~ 850	24	1180~1210 ^② 1210~1230 ^③	12~15	油	550~580℃ 回 火 3 次, 每 次 1h, 空 冷	≥65			
11		W6Mo5Cr4V3	850~870	2		≤277	850~870	2		≤255	850	24	1200~1230	12~15	油	550~570℃ 回 火 3 次, 每 次 1h, 空 冷	≥64			
12		W6Mo5Cr4V2Co5	840~860	2		≤285	840~860	2		≤269	800~ 850	24	1210~1230	12~15	油	550℃ 回 火 3 次, 每 次 1h, 空 冷	≥64			

(续)

序号	钢 号	钢锭、钢坯、钢材的退火工艺						淬火和回火工艺					
		软化退火			等温退火			淬火预热		淬火加热		淬火介质	回火工艺
		加热温度 /°C	保温 时间 /h	冷却	硬度 HBW	加热温度 /°C	保温 时间 /h	冷却	硬度 HBW	温度 /°C	时间 /s mm ⁻¹		
13	W6Mo3Cr4V5Co5	850~870	2	以 20 ~ 30°C/h 冷却到 500~ 600°C, 然 后炉冷或 堆冷	≤285	850~870	2	炉冷至 740~750°C, 保温 2~4h, 然后炉冷至 500~600°C, 出炉空冷	≤277	800~ 850	24	油	540~560°C回火 3 次, 每 次 1h, 空冷
14	W12Cr4V5Co5	850~870	2		≤285	850~870	2		≤277	800~ 850	24	油	530~550°C回火 3 次, 每 次 1h, 空冷
15	W2Mo9Cr4VCo8	860~880	2		≤285	860~880	2		≤269	850	24	油	550~570°C回火 4 次, 每 次 1h, 空冷
16	W10Mo4Cr4V3- Co10	850~870	2		≤311	850~870	2		≤302	800~ 850	24	油	550~570°C回火 3 次, 每 次 1h, 空冷
17	W12Mo3Cr4V3N	840~860	2		≤293	840~860	2		≤285	850	24	油	550~570°C回火 4 次, 每 次 1h, 空冷
18	W18Cr4V4SiNbAl	870~890	2		≤352	870~890	2		≤341	850	24	油	530~560°C回火 4 次, 每 次 1h, 空冷
19	FW12Cr4V5Co5					860	2	炉冷至 750°C, 保温 4h, 再随炉冷	≤277	850	24	油	520~540°C回火 3~4 次, 每次 2h, 空冷
20	FW10Mo5Cr4- V2Co12					860	2	炉冷至 300~ 400°C, 出 炉空冷	280~ 302	850	24	油	500~530°C回火 3~4 次, 每次 2h, 空冷

注: 高速钢的热处理特点及注意事项如下。

1. 高速钢淬火加热温度范围较窄, 为了确保淬火质量, 必须严格控制。
2. 在设有盐浴加热的条件下, 淬火加热可在箱式炉中进行, 但必须采用保护性介质或气氛加以保护, 以防氧化、脱碳。在这种情况下, 淬火加热保温时间亦应酌情增加。
3. 简单刀具采用上限淬火温度, 薄刃、复杂刀具采用下限淬火温度 (已注明者除外)。
4. 对于小件工具, 淬火加热保温时间不得少于 1.5min。
5. 高速钢淬火后应及时回火 (不得超过 24h), 防止开裂及奥氏体稳定化。
6. W6Mo5Cr4V2、W6Mo5Cr4V2Al、W10Mo4Cr4V3Al、W6Mo5Cr4V5SiNbAl、W2Mo9Cr4V2、W6Mo5Cr4V3 以及其他钼系高速钢易氧化、脱碳, 退火时应采用装箱退火或在保护气氛炉中退火。

① 高强薄刃刀具淬火温度。② 复杂刀具淬火温度。③ 简单刀具淬火温度。④ 冷作模具淬火温度。

表 16-22 W18Cr4V 钢的分级冷却法

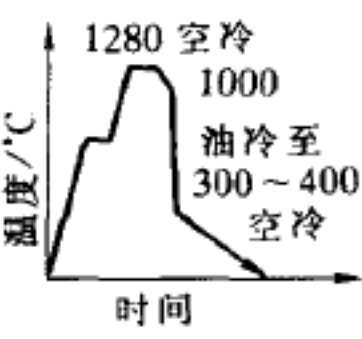
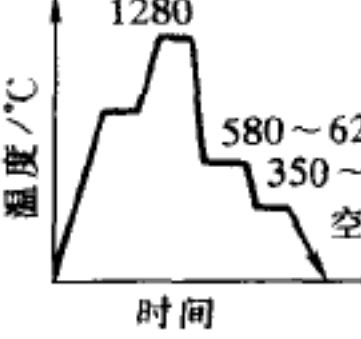
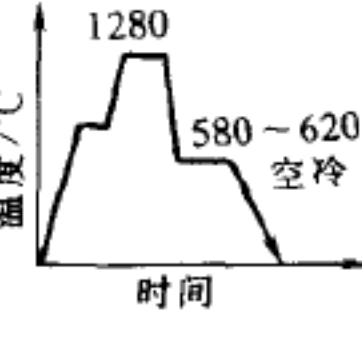
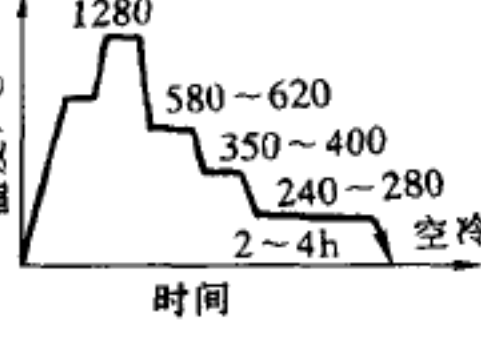
分级冷却工艺规范	应用范围	分级冷却工艺规范	应用范围
	一般刀具(如车刀、铰刀、直柄钻头、立铣刀等)		对尺寸较大(有效厚度约 40~60mm)和形状复杂的刀具
			直径较大的圆片状刀具(如 $\phi \geq 120\text{mm}$ 的锯片铣刀, 厚度仅 6~10mm)和细长的易变形刀具(如 $\phi 4 \sim 8\text{mm}$ 长柄麻花钻)

表 16-23 等温时间对 W18Cr4V 钢组织和硬度的影响
(1290℃加热,260℃等温)

等温时间 /h	等温后冷却的 M_s 点 /℃	室温下的相组成(体积分数)(%)				硬 度 HRC
		碳 化 物	贝 氏 体	马 氏 体	残留奥氏体	
0	210	5	0	75	20	65.6
1	160	5	25	45	25	65.5
2	70	5	40	20	35	61.2
3	<0	5	50	0	45	57.8
4	<0	5	55	0	40	59.4

表 16-24 各种工具真空气淬结果

产品名称	淬火温度 /℃	冷却压强/MPa	晶粒号	淬火硬度 HRC	回火硬度 HRC
m3~5 齿轮滚刀	1215~1220	0.4~0.5	9.5 [#] ~10 [#]	65~65.5	64~65.5
$\phi 100\text{m}3$ 插齿刀	1220~1225	0.4~0.5	9.5 [#] ~10 [#]	64.5~65.5	64~65
$\phi 3 \sim \phi 5$ 中心钻	1210~1215	0.3~0.4	10 [#]	65~66	64~65
M5~M20 机用丝锥	1210~1215	0.3~0.4	10 [#]	65~66	64~65
$\phi 1.5\text{mm} \sim \phi 2.5\text{mm}$ 仪表钻	1210~1215	0.3~0.4	10 [#]	65.5~66	65~66

表 16-25 高速钢碳化物不均匀度级别

刀 具 种 类	钢材尺寸/mm	碳 化 物 级 别	备 注
齿轮刀具 螺纹刀具 拉 刀	$\phi \leq 40$	≤ 3	钻头、铣刀、车刀等通用刀具的碳化物级别可以放宽 1 级
	$\phi > 40 \sim 60$	≤ 4	
	$\phi > 60 \sim 80$	≤ 5	
	$\phi > 80 \sim 100$	≤ 6	
	$\phi > 100 \sim 120$	≤ 7	

表 16-26 高速钢刀具常用表面化学热处理方法

名 称	介 质	规 范
蒸汽处理	过热($>300^{\circ}\text{C}$)水蒸气	$540 \sim 560^{\circ}\text{C}$, 60 ~ 90min 炉内压力: 20 ~ 50kPa
氮碳共渗	1. $\phi_{\text{氮}}$ 50% 和 $\phi_{\text{吸热型气氛}}$ 50% 的混合气体, 露点为 -1°C 2. 甲酰胺(COHNH_2)热分解气氛 3. 三乙醇胺[($\text{C}_2\text{H}_4\text{OH}$) ₃ N]热分解气氛	$560 \sim 570^{\circ}\text{C}$, 20 ~ 60min
液体氮碳共渗	1. $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 40%, NaCO_3 30%, KCl 20%, NaOH 10% 2. KCN 47%, NaCN 53%, 通入干燥压缩空气 3. $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 34%, NaCN 43%, K_2CO_3 23% 通入干燥压缩空气	$530 \sim 550^{\circ}\text{C}$, 15 ~ 60min
气体硫氮共渗	NH_3 92% ~ 96%, H_2S 8% ~ 4%	$530 \sim 540^{\circ}\text{C}$, 30 ~ 90min
液体硫氮共渗	1. 以氯盐(BaCl_2 31%, NaCl 21%, CaCl_2 48%)为基, 加入 FeS 10%, 并通入 NH_3 。盐浴中 $\text{S} > 0.5\%$ 2. 按 $\text{NaCN}:\text{KCN}:\text{Na}_2\text{S}:\text{KCNS}:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 的配比为 15:5:1:1:1, 盐浴中 $\text{CNO} > 15\% \sim 20\%$, $\text{S} > 0.5\% \sim 1.0\%$	$540 \sim 550^{\circ}\text{C}$, 5 ~ 60min
渗氮氧化	氨水(25% ~ 28% 氨)的蒸发气氛	$520 \sim 560^{\circ}\text{C}$, 30 ~ 120min
离子渗氮	在真空容器中通入含氮的气体, 工件接直流电源的阴极, 在高压下发生辉光, 氮离子由阳极向阴极轰击	真空度 500 ~ 650Pa 电压: 450 ~ 500V 电流密度 $1.5\text{A}/\text{cm}^2$ 温度 $530 \sim 540^{\circ}\text{C}$ 时间 10 ~ 30min
盐浴复合处理	渗氮盐浴($\text{CNO}:30\% \sim 35\%$, $\text{CN}:1\% \sim 3\%$), 氧化盐浴	预热: $350 \sim 400^{\circ}\text{C}$, 15 ~ 20min 渗氮盐浴: $530 \sim 550^{\circ}\text{C}$, 10 ~ 40min 氧化盐浴: 350°C , 15min

注: 介质成分未注明者均为质量分数。

表 16-27 空心阴极离子镀刀具涂层的工艺参数

1	2	3	4	5	6		7
预抽真空/Pa	工件轰击电压/V	氩气压力/MPa	工件预热功率/kW	温度/℃	引束条件		工件偏压
1.33×10^{-3}	600 ~ 1200	$1.33 \sim 2.66 \times 10^{-4}$	3 ~ 4	300 ~ 400	电压/V	电流/A	30 ~ 40V
					500 ~ 600	10 ~ 20	3 ~ 5A
8			9	10	11		12
引束条件			氩气流量/mL·min ⁻¹	氮气流量/mL·min ⁻¹	沉积速度/μm·min ⁻¹		沉积时间
电压/V	电流/A	功率/kW	20 ~ 40	50 ~ 80	0.1 ~ 0.5(固定)		视涂层厚度要求
50 ~ 55	100 ~ 150	5 ~ 8			0.04 ~ 0.1(转动)		

(2) 力学性能

1) W18Cr4V(图 16-38 ~ 图 16-45)

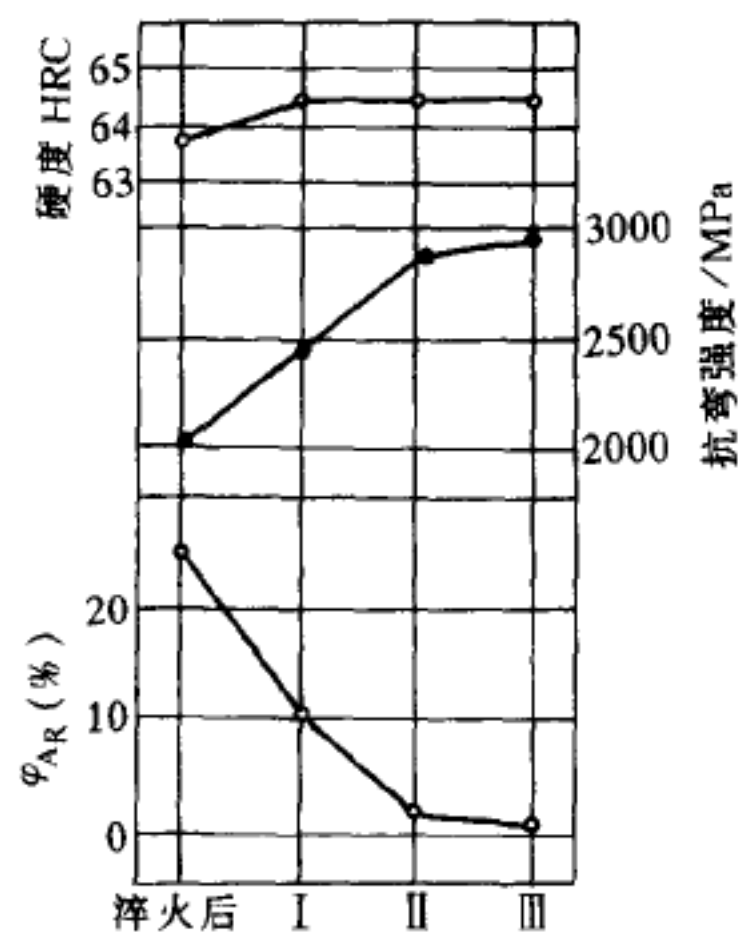


图 16-38 回火次数对 W18Cr4V 钢性能的影响

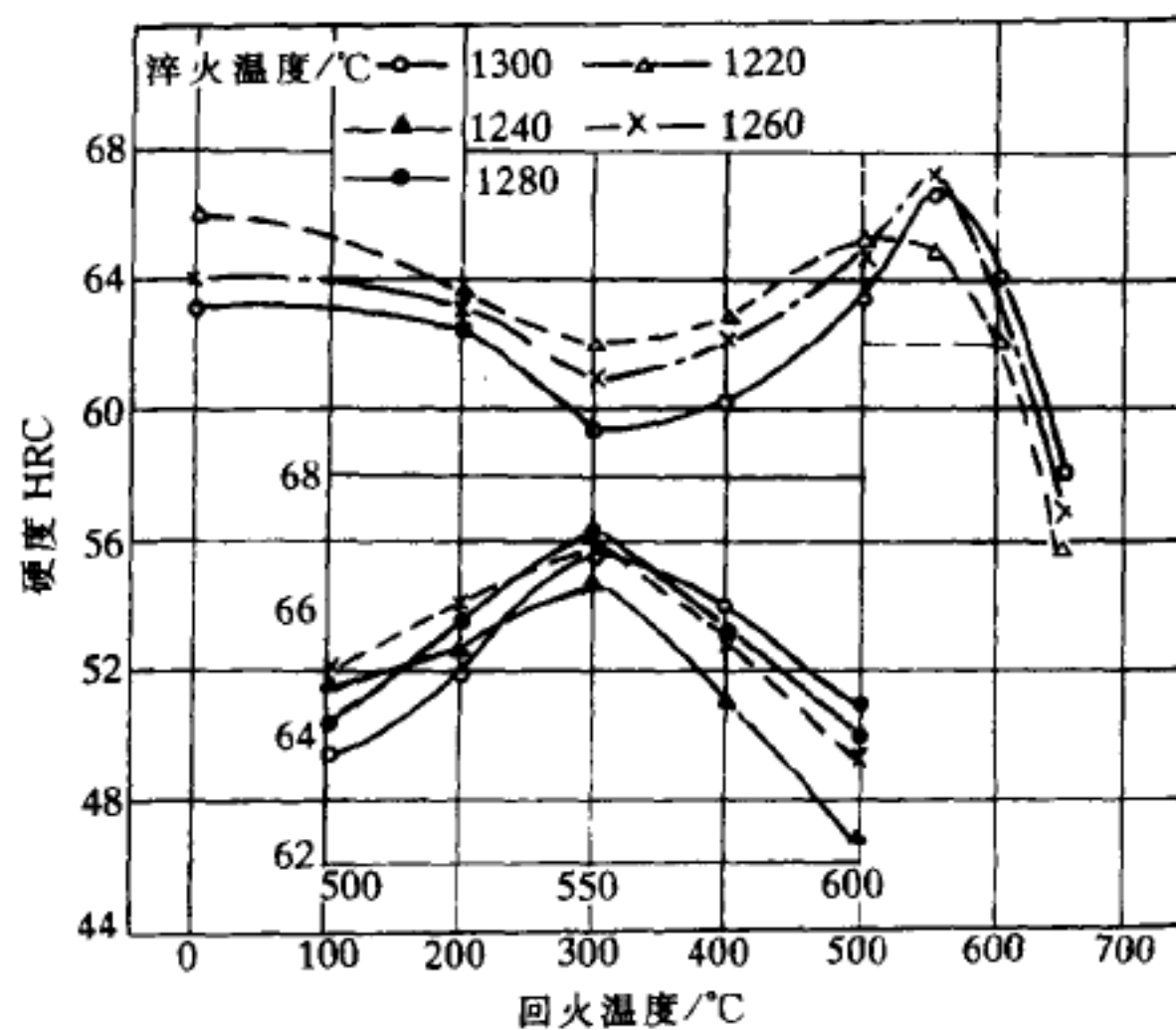
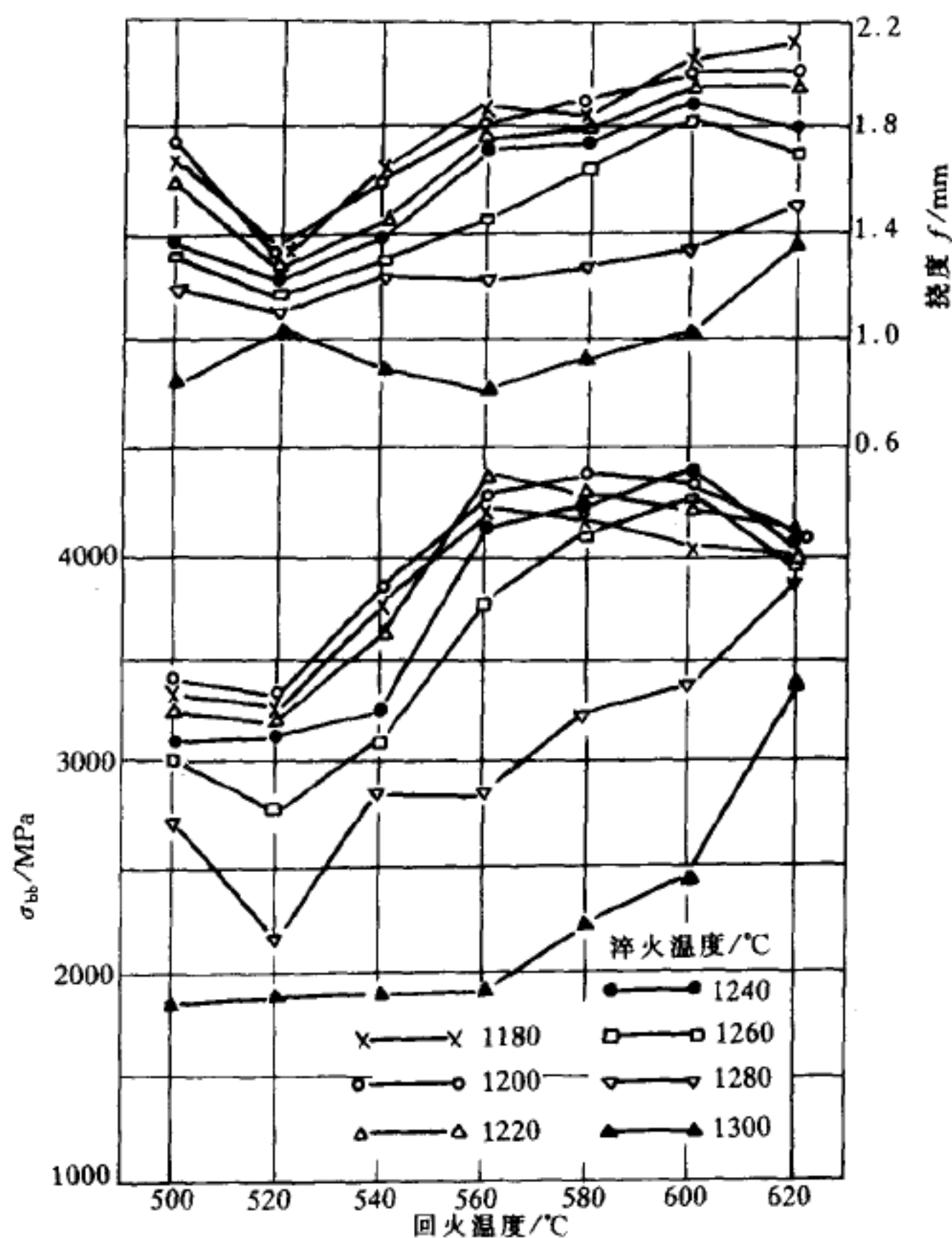


图 16-39 W18Cr4V 高速钢不同淬火温度下的回火硬度曲线

图 16-40 不同温度淬火时抗弯强度及挠度与回火温度的关系
(试样尺寸: $\phi 5\text{mm} \times 70\text{mm}$ 跨距 50mm)

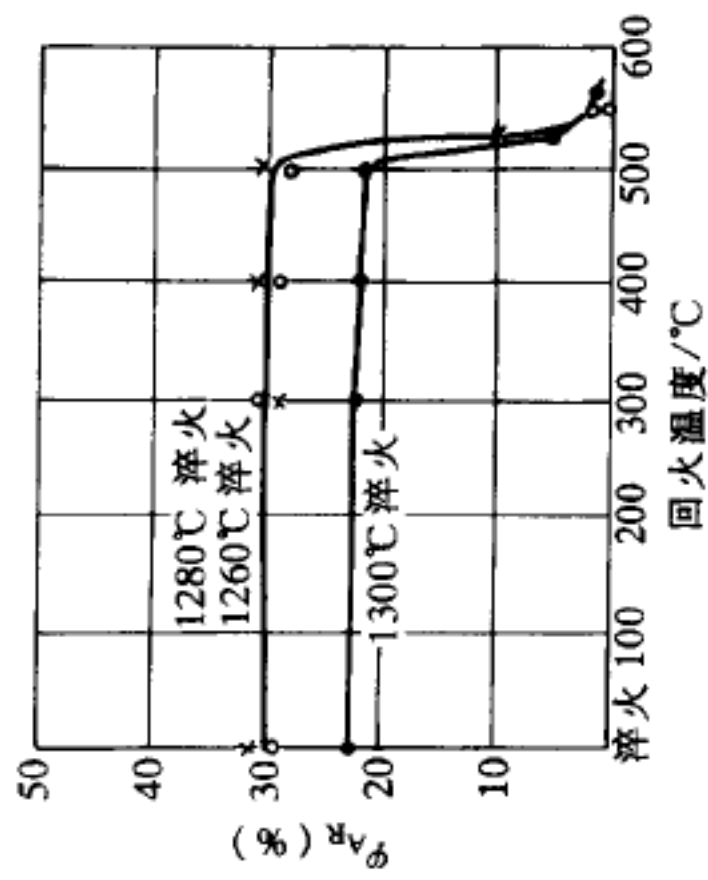


图 16-44 残留奥氏体量
与回火温度的关系

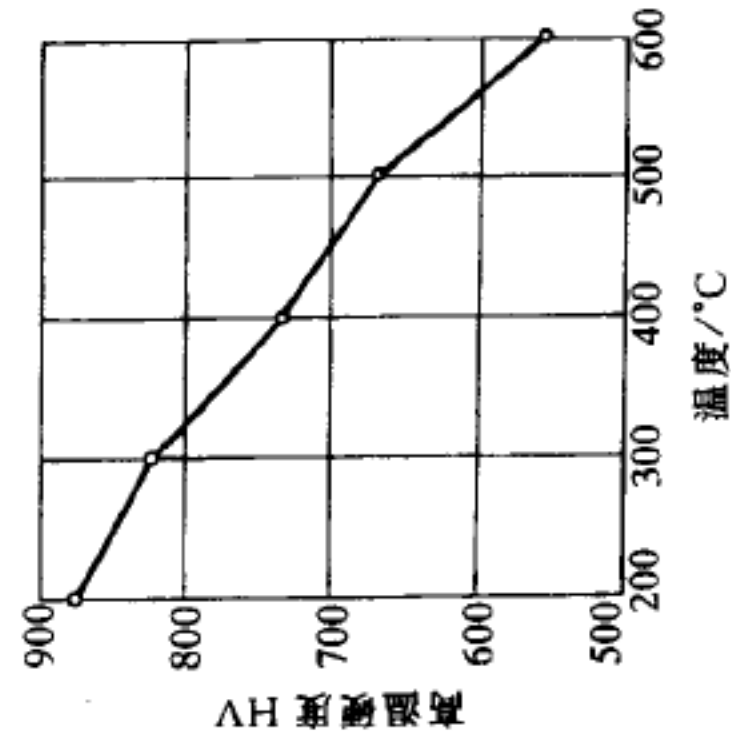


图 16-45 高温硬度曲线

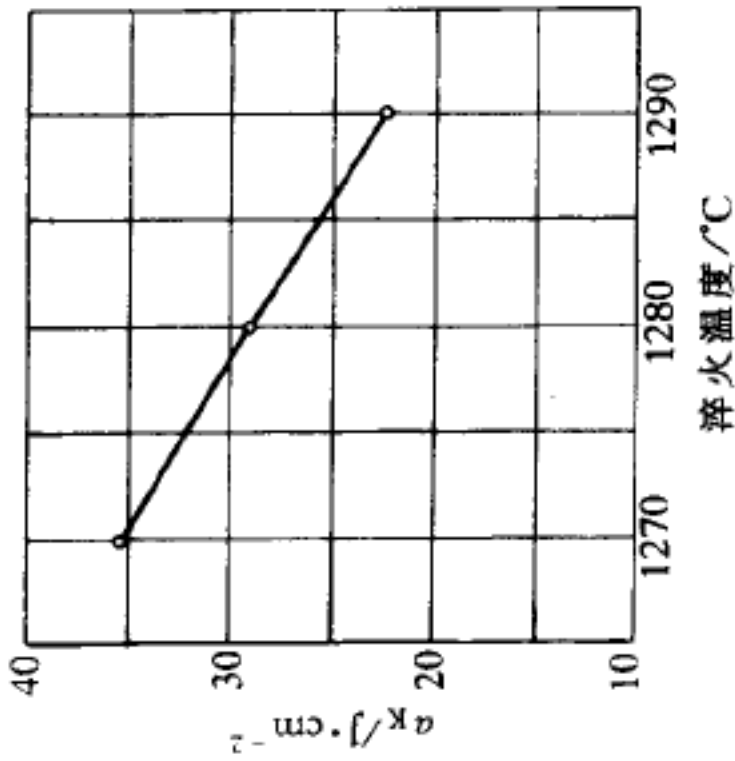


图 16-42 在不同淬火温度下的冲击韧性
(试样尺寸 10 × 10 × 55mm, 无缺口)

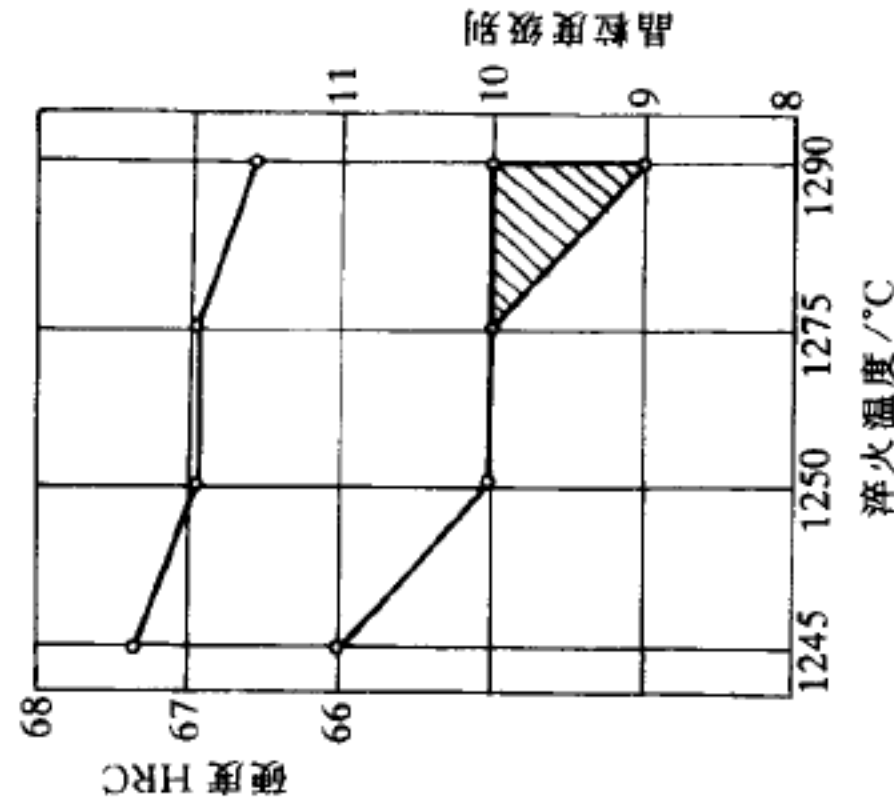


图 16-43 淬火硬度及奥氏体晶粒
度与淬火温度的关系

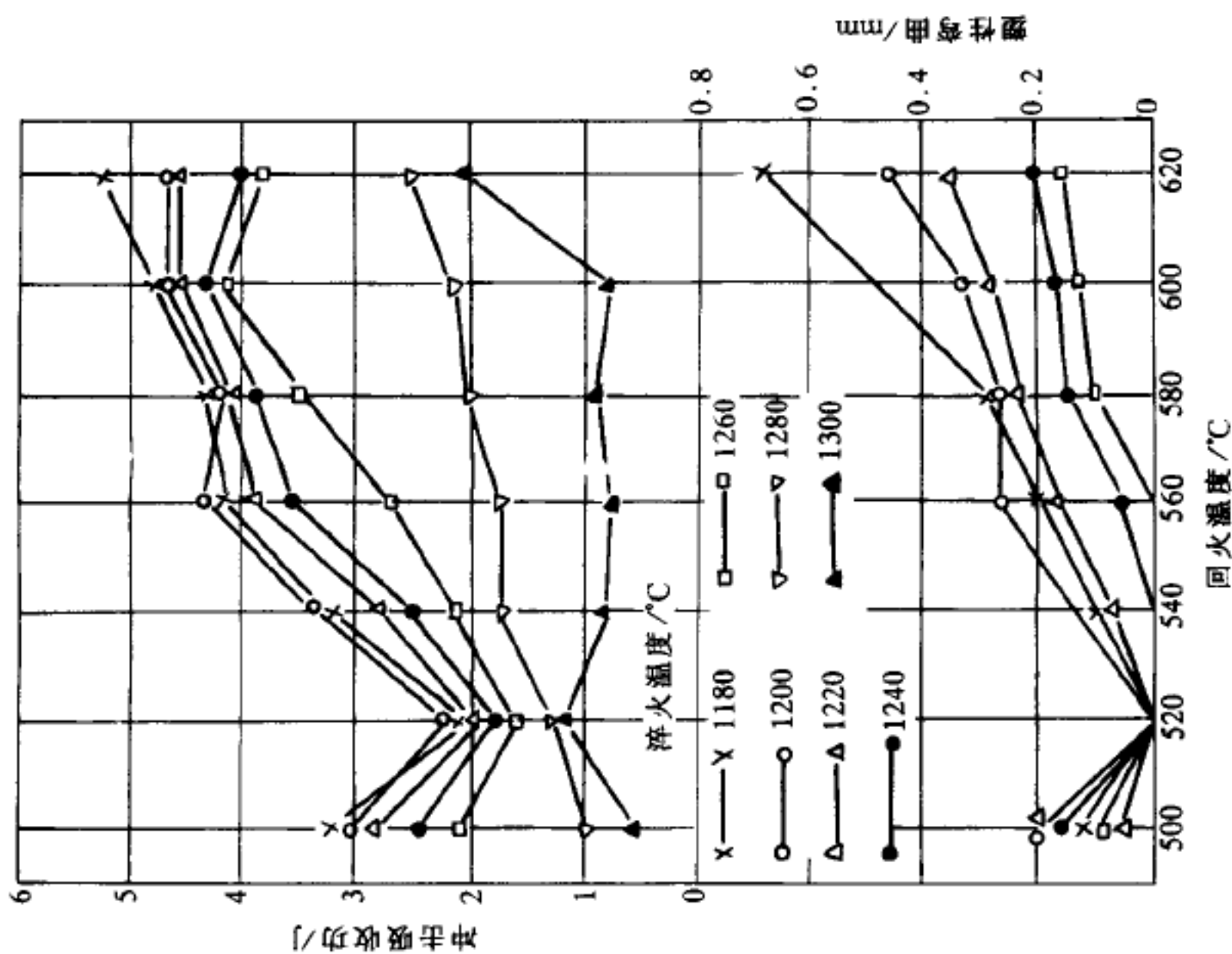


图 16-41 抗弯试验吸收能量
及塑性弯曲与淬火温度, 回火温度的关系

2) W6Mo5Cr4V2(图 16-46 ~ 图 16-53 及表 16-28)

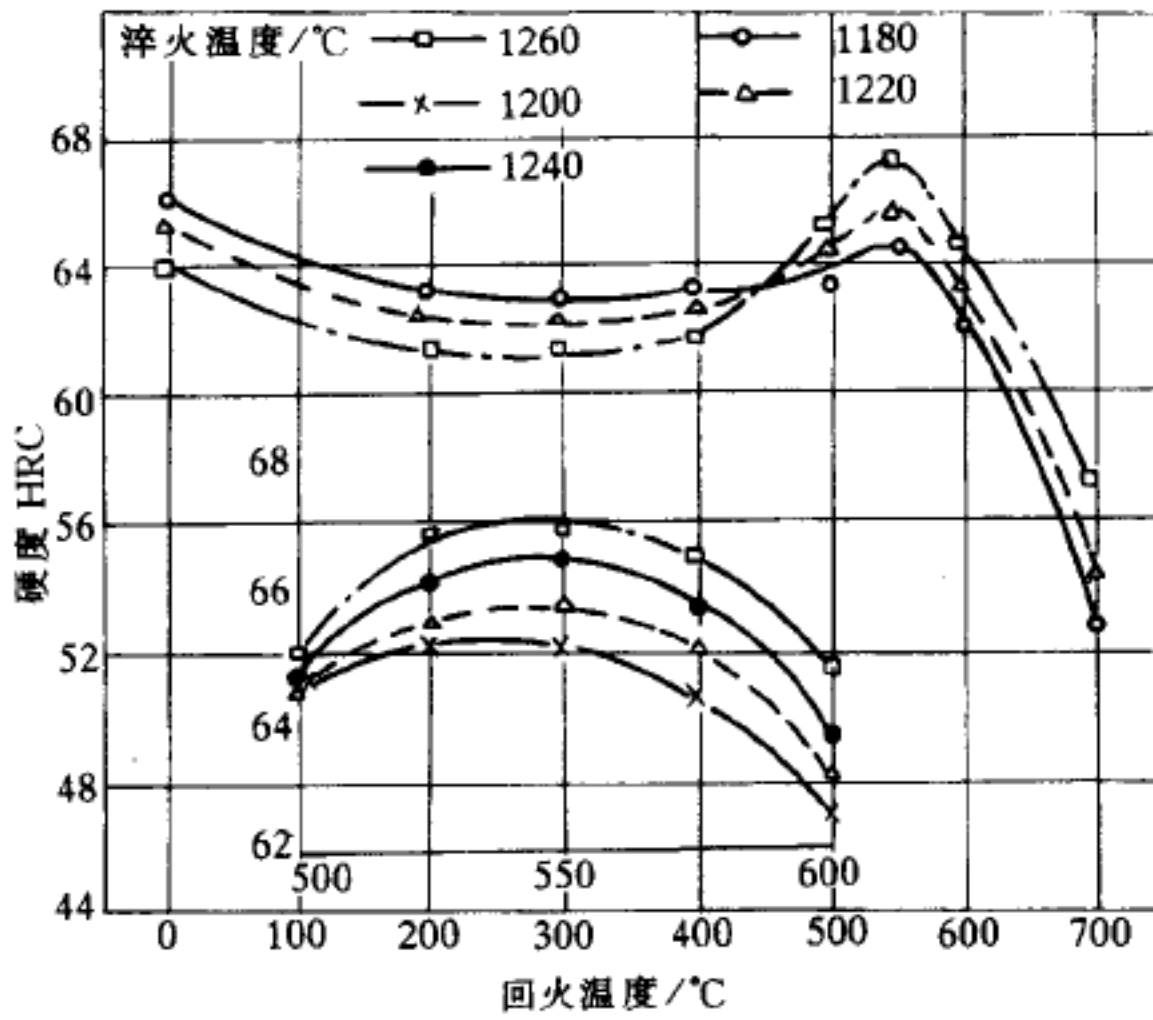


图 16-46 回火硬度曲线

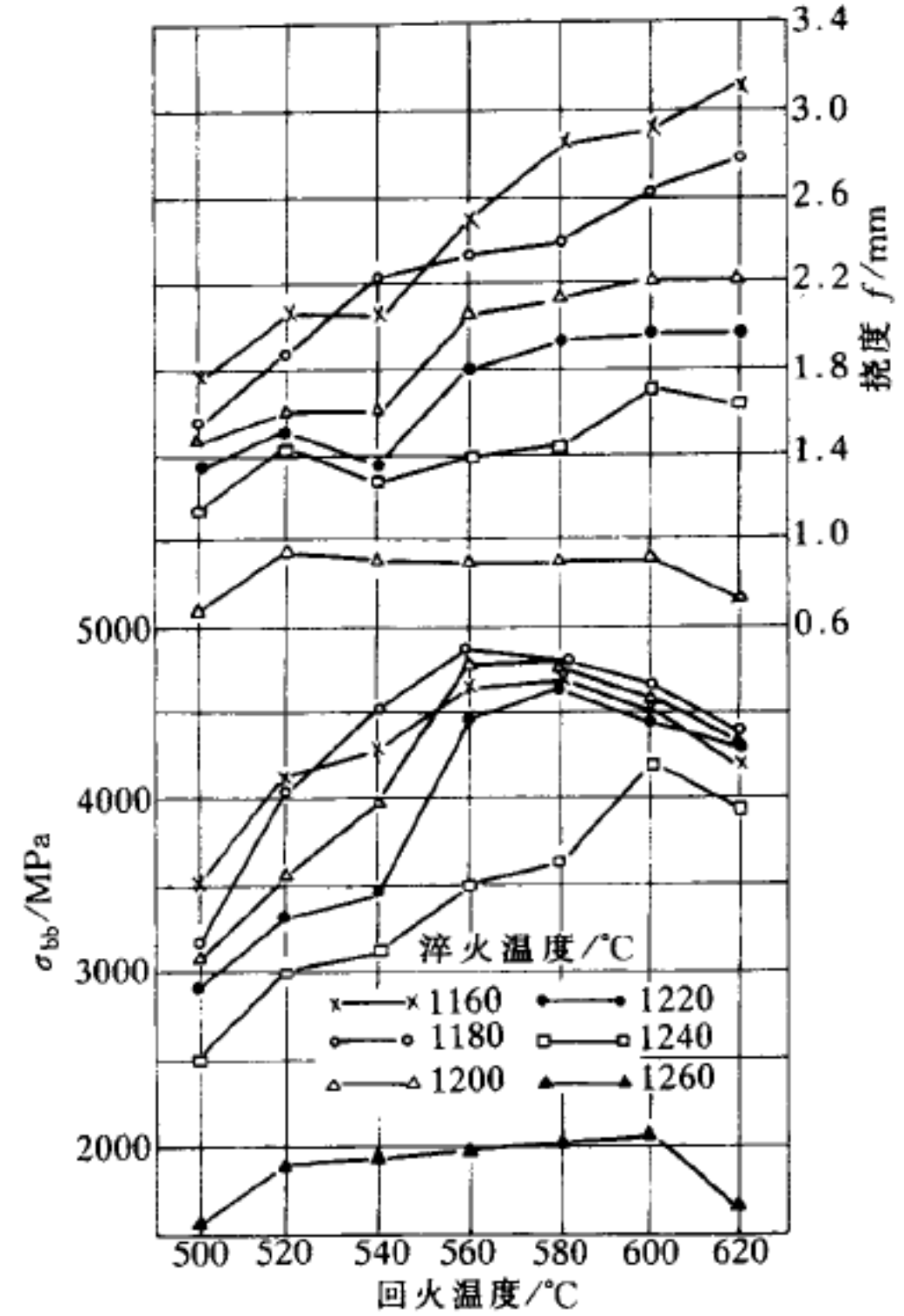


图 16-47 抗弯强度及挠度与淬火温度、回火温度的关系

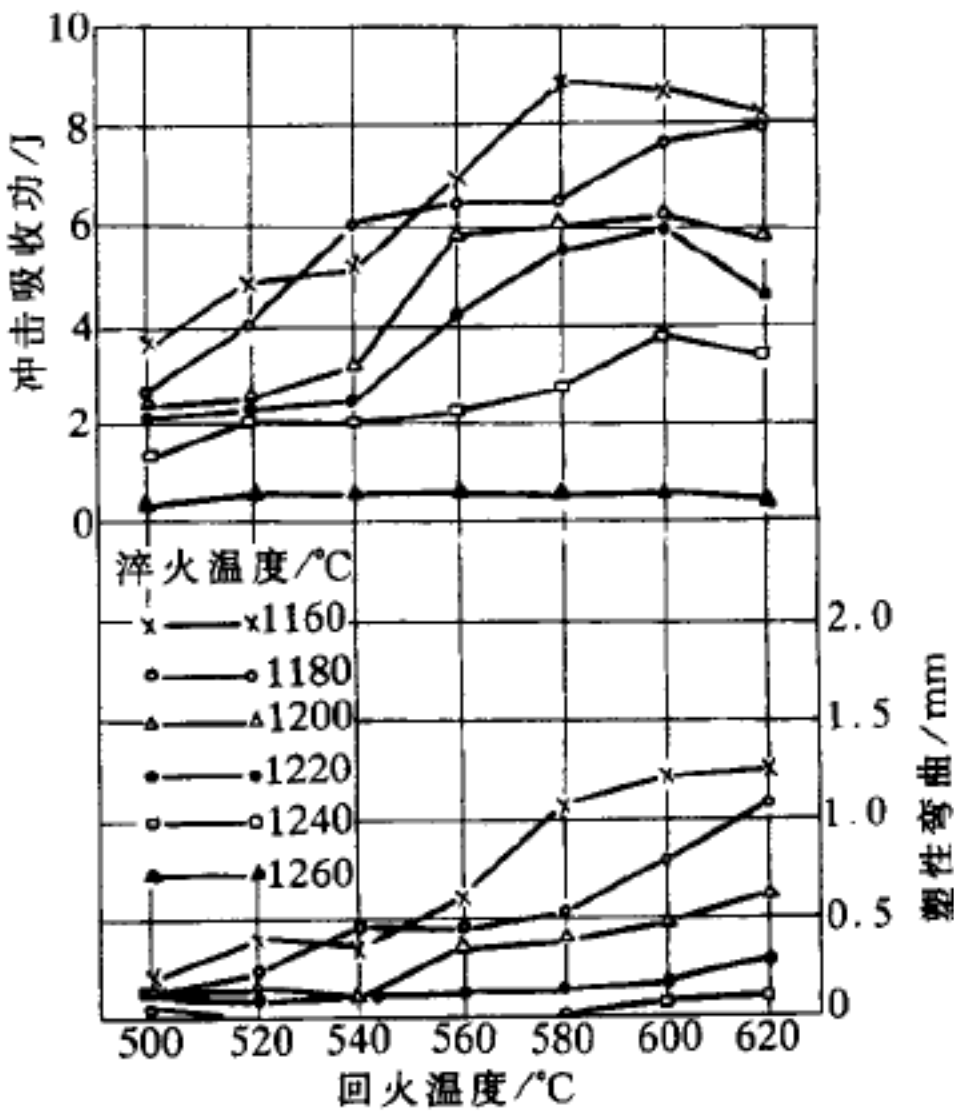


图 16-48 抗弯试验吸收能量及塑性弯曲与淬火温度、回火温度的关系

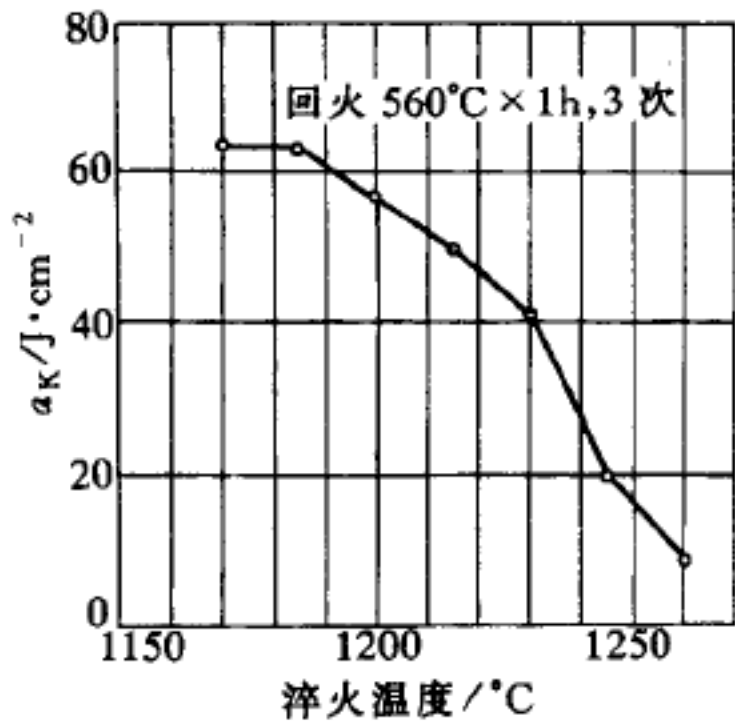


图 16-49 冲击韧性(无缺口)与淬火温度的关系
(试样尺寸:10mm × 10mm × 55mm)

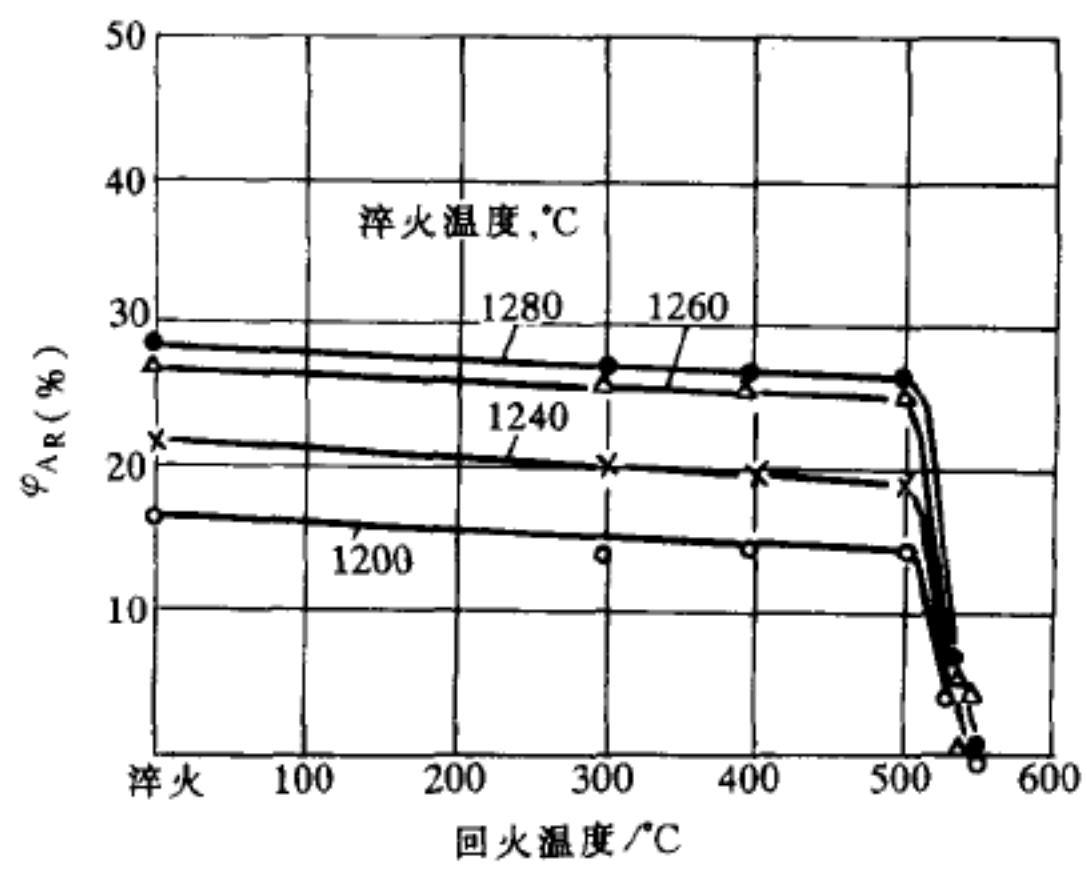


图 16-50 残留奥氏体量与回火温度的关系

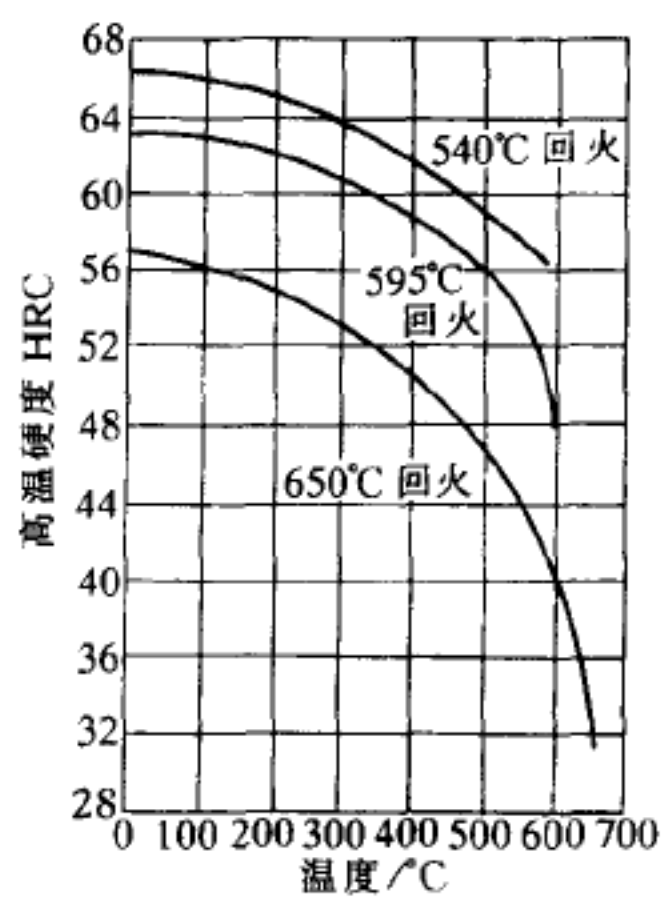


图 16-51 高温硬度曲线

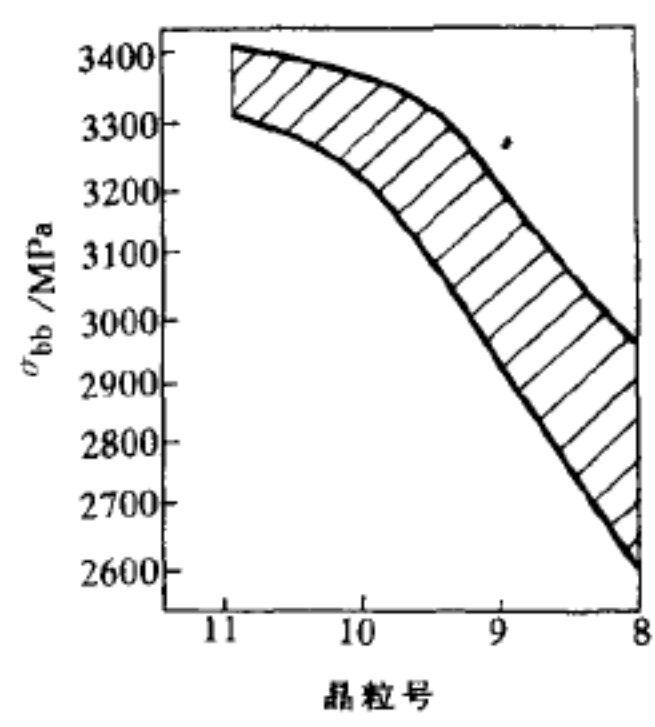


图 16-52 晶粒大小对 W6Mo5Cr4V2 钢抗弯强度的影响

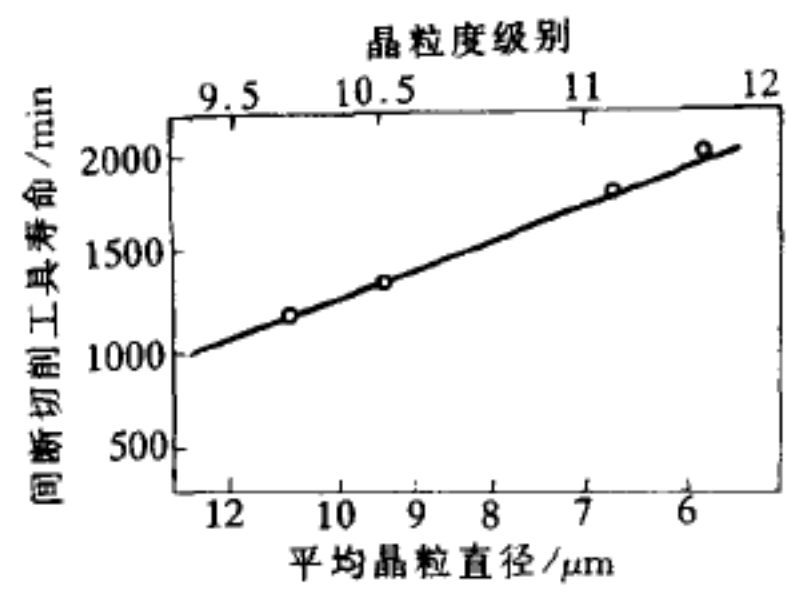


图 16-53 晶粒度对 W6Mo5Cr4V2 钢工具间断切削寿命的影响

3) W14Cr4VMnRE(图 16-54 ~ 图 16-56, 表 16-28)

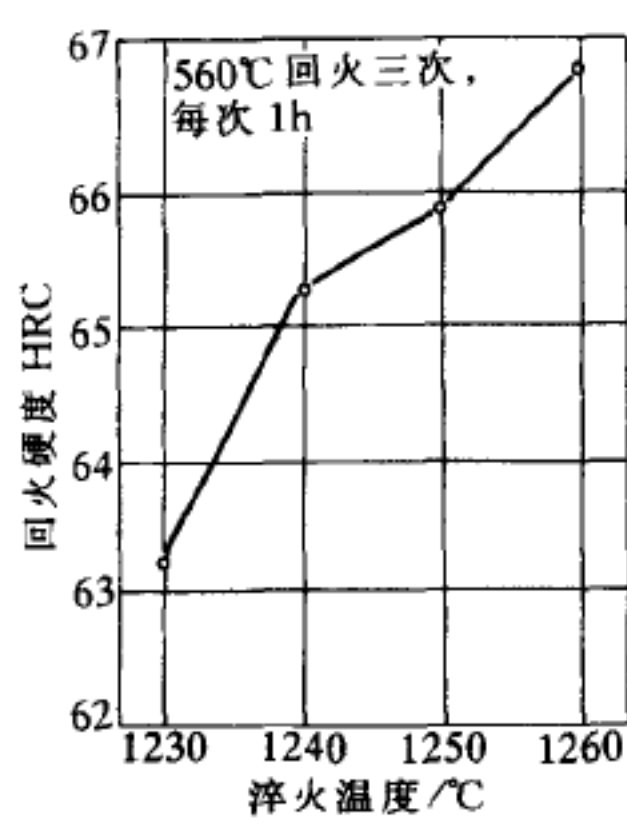


图 16-54 回火硬度与淬火温度的关系

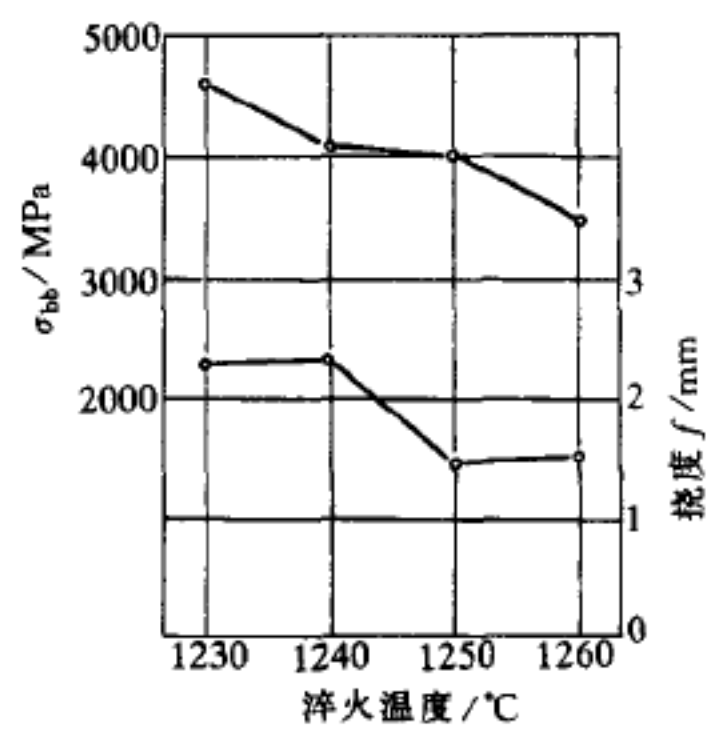


图 16-55 抗弯强度及挠度与淬火温度的关系

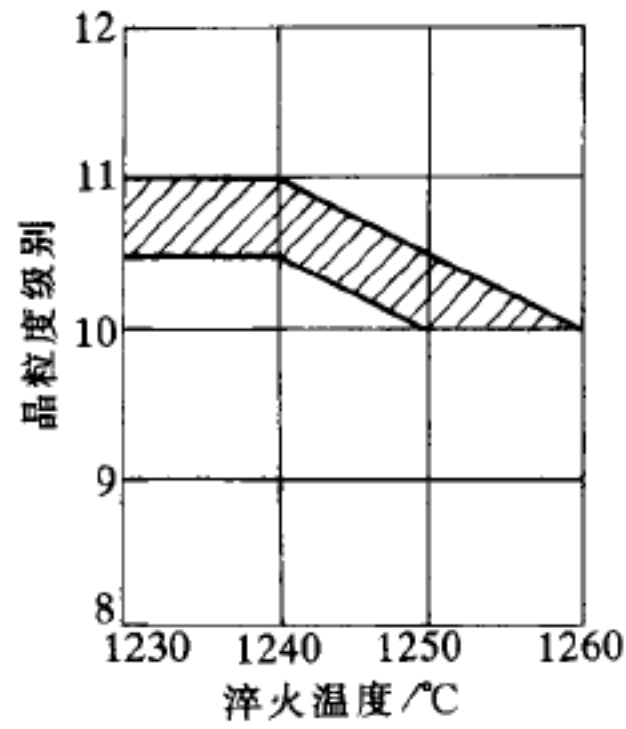


图 16-56 不同淬火温度下的奥氏体晶粒度

表 16-28 钢的热硬性

热 处 理 制 度	625℃加热 4h 后硬度 HRC
1230℃油淬,560℃回火 3 次,每次 1h	58.7
1240℃油淬,560℃回火 3 次,每次 1h	59.8
1250℃油淬,560℃回火 3 次,每次 1h	61.3
1260℃油淬,560℃回火 3 次,每次 1h	61.3

4) 9W18Cr4V(图 16-57 ~ 图 16-61,表 16-29)

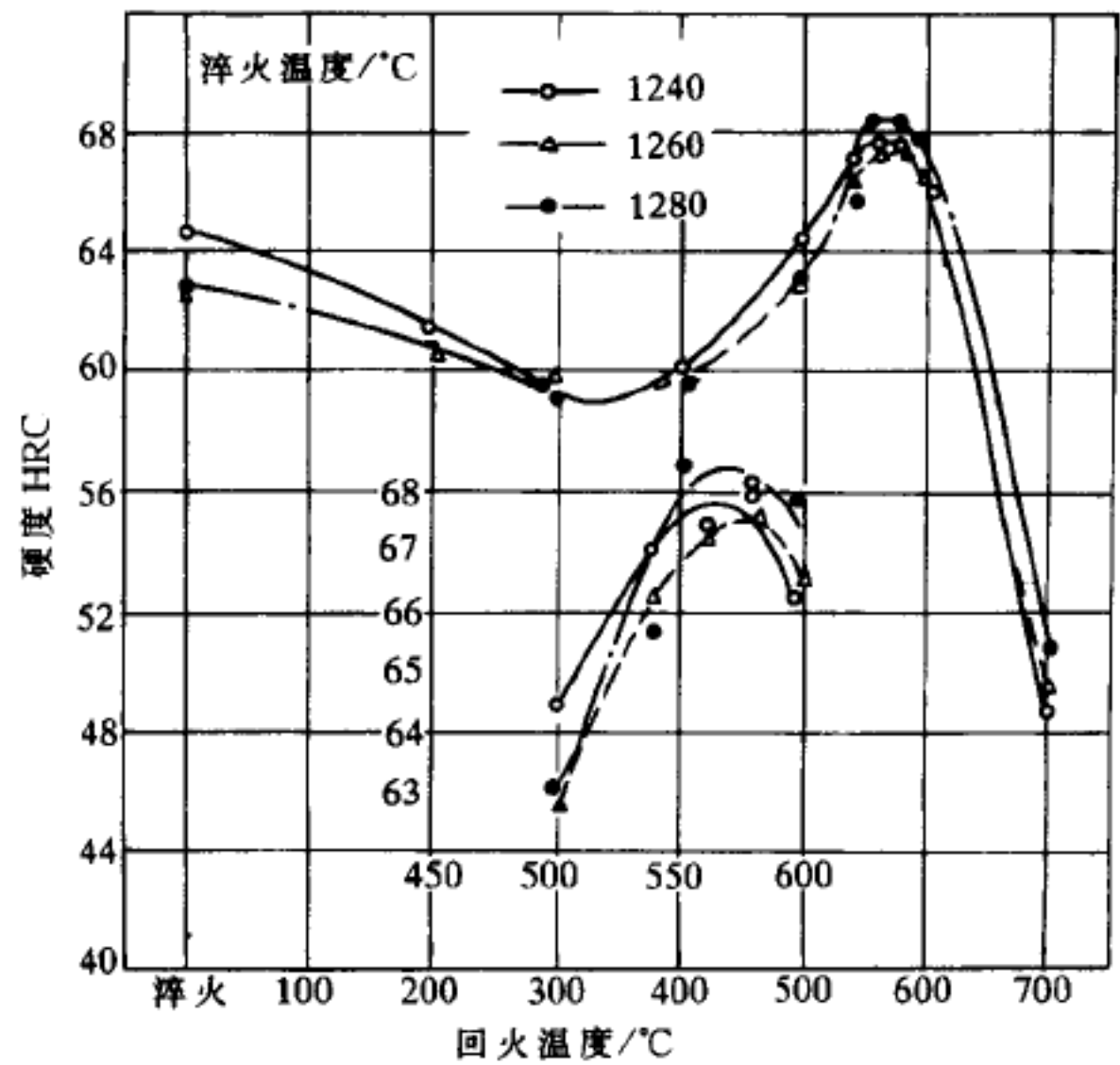


图 16-57 不同淬火温度下的回火硬度曲线

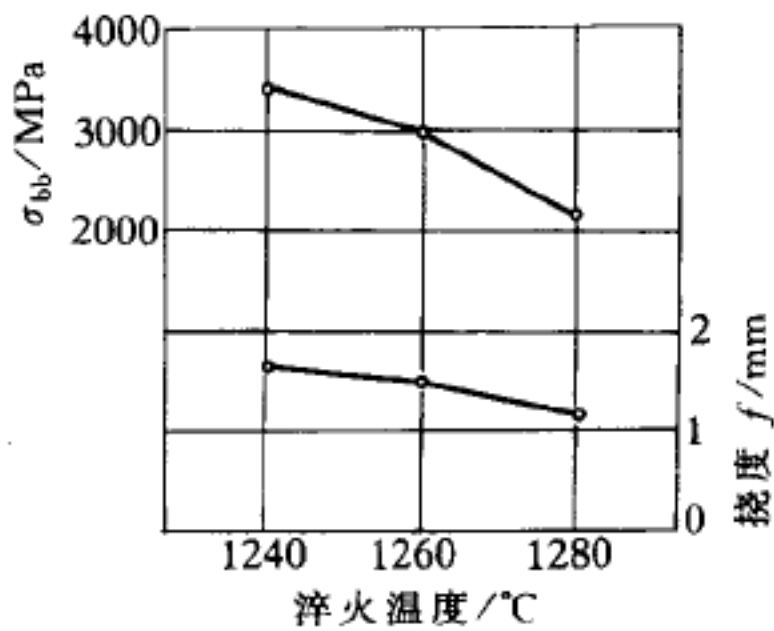


图 16-58 抗弯强度及挠度
与淬火温度的关系
(560℃回火 4 次,每次 1h)

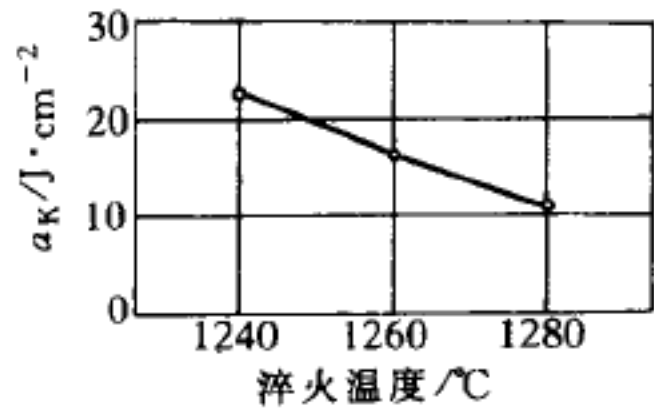


图 16-59 冲击韧度与淬火温度的关系
(无缺口试样;560℃回火 4 次每次 1h)

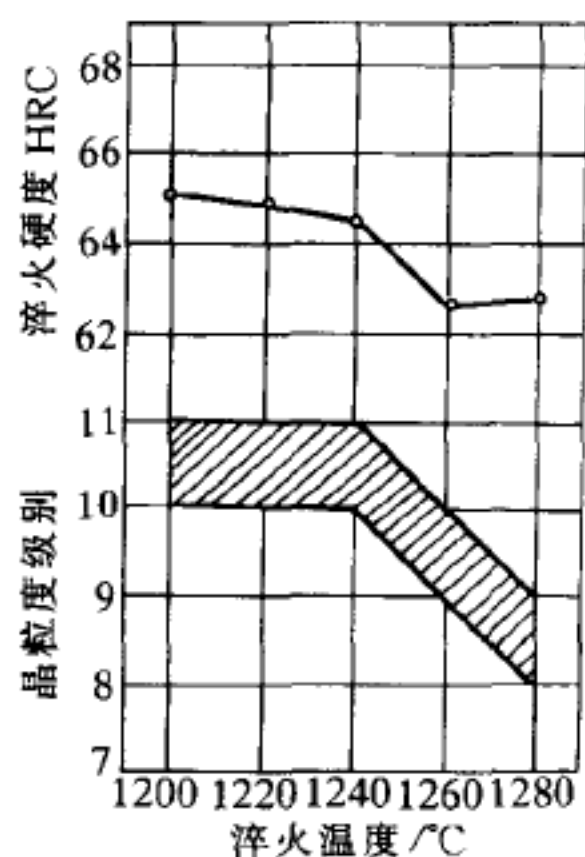


图 16-60 淬火硬度及奥氏体晶粒度
与淬火温度的关系

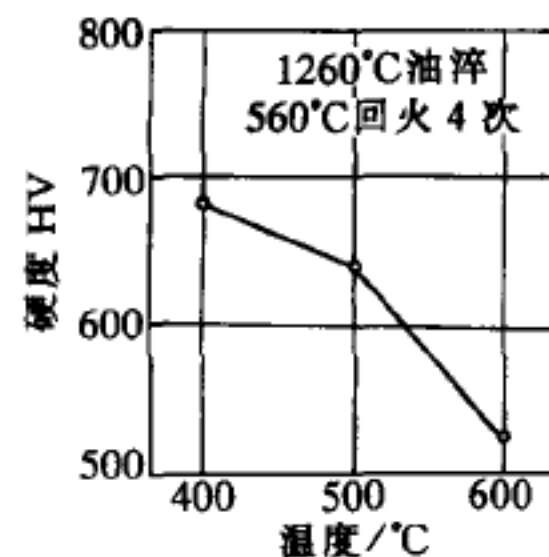


图 16-61 高温硬度曲线

表 16-29 热硬性

热 处 理 制 度	625℃加热 4h 后硬度 HRC
1240℃油淬 560℃回火 4 次	61.7
1260℃油淬 560℃回火 4 次	62.6

5) W12Cr4V4Mo(图 16-62 ~ 图 16-66)

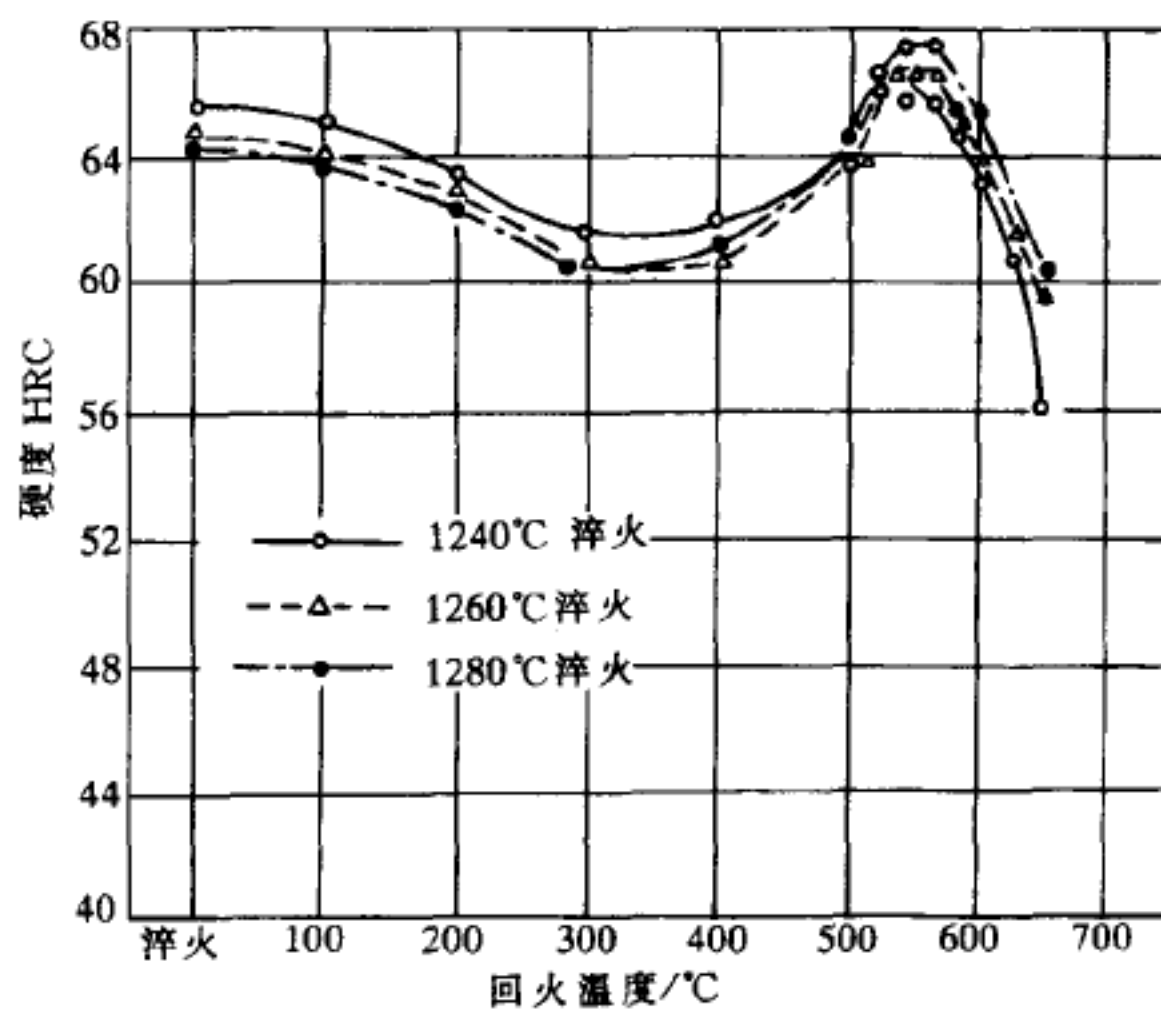


图 16-62 回火硬度曲线

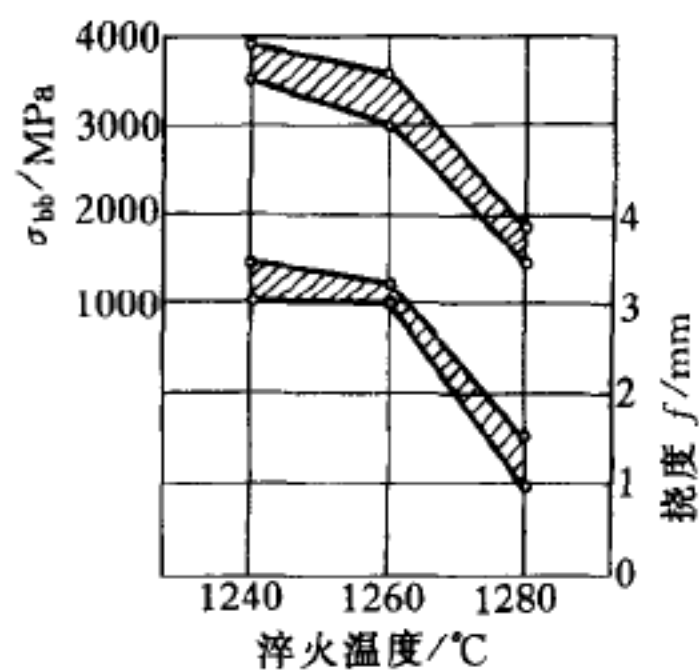


图 16-63 抗弯强度及挠度
与淬火温度的关系

(回火: 560℃ × 2 次 + 570℃ × 2 次)

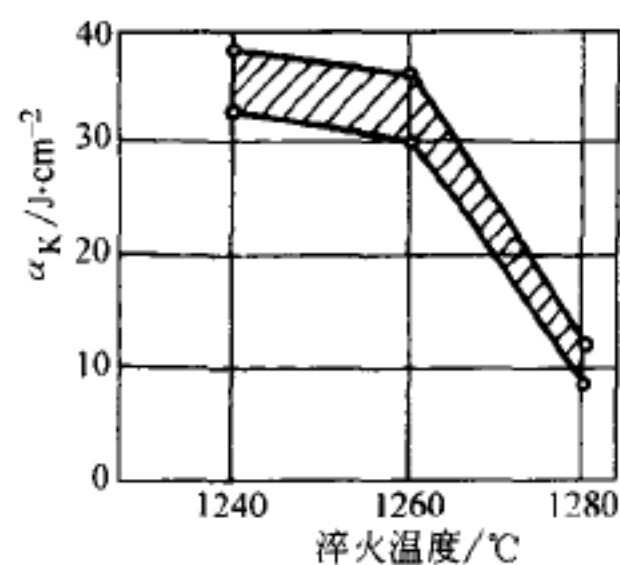


图 16-64 无缺口冲击韧度与淬火温度的关系

(无缺口试样; 回火: 560℃ × 2 次 + 570℃ × 2 次)

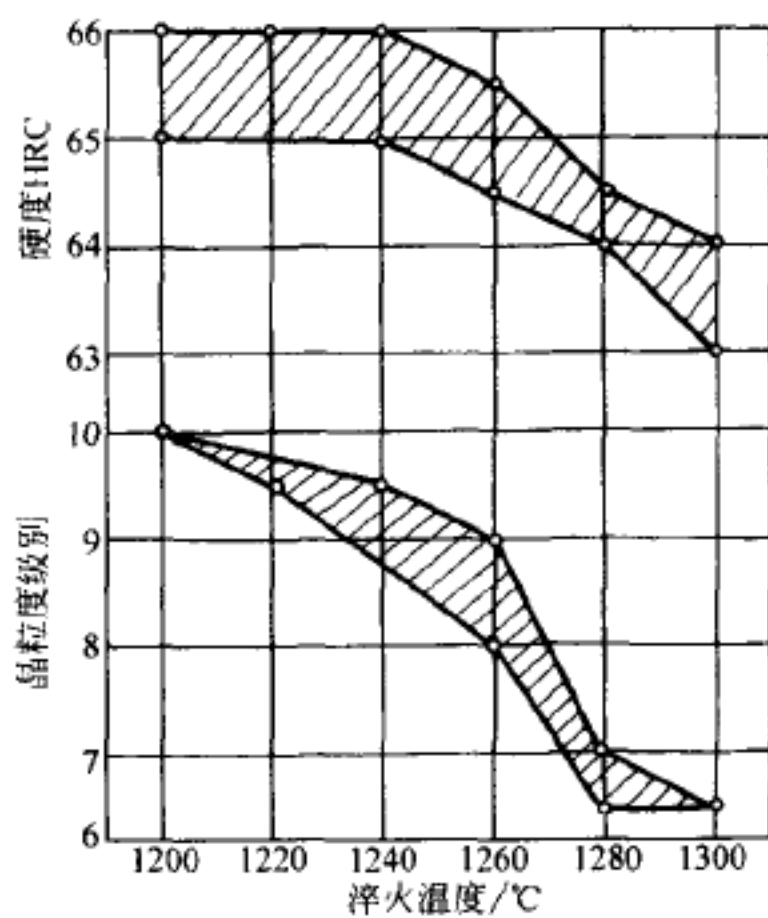


图 16-65 淬火硬度及奥氏体晶
粒度与淬火温度的关系

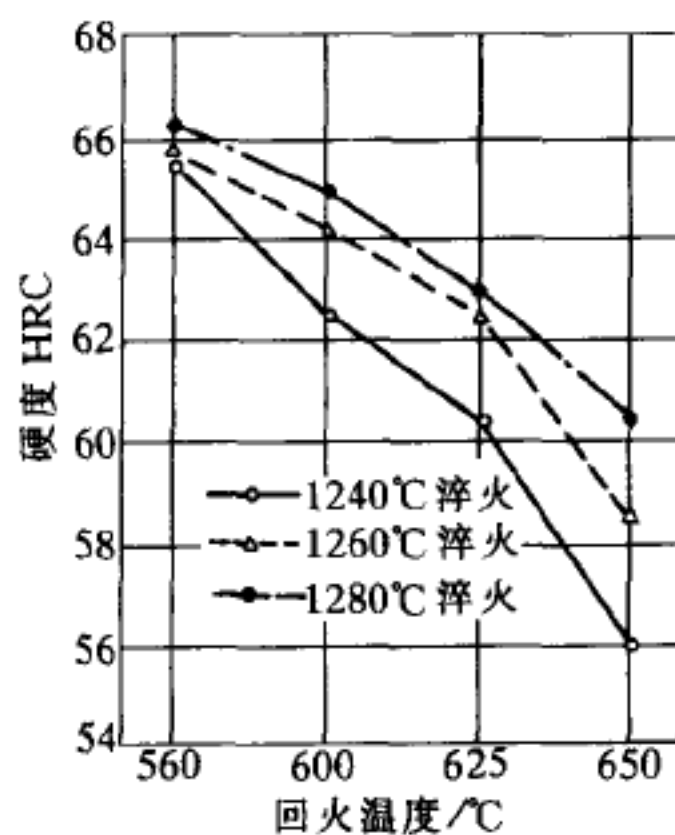


图 16-66 高温硬度

6) W6Mo5Cr4V2Al(图 16-67 ~ 图 16-71, 表 16-30)

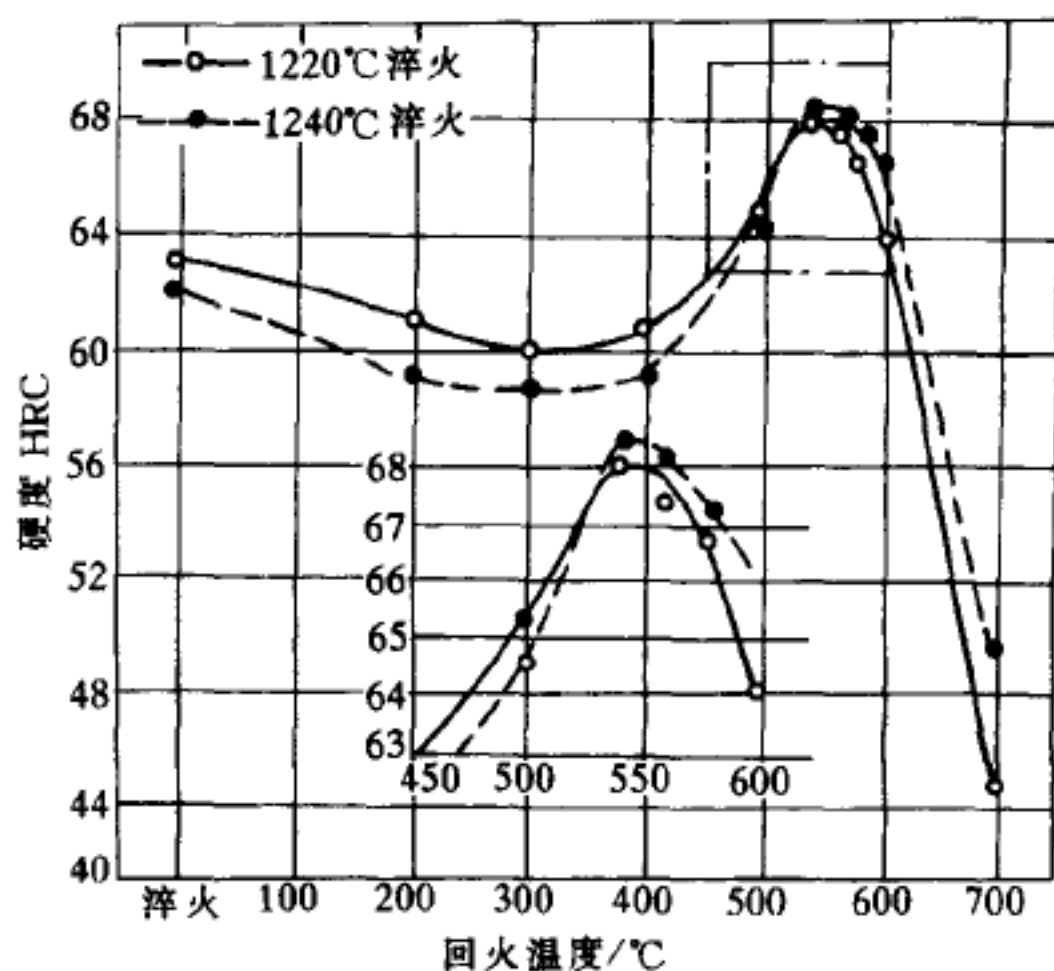


图 16-67 回火硬度曲线

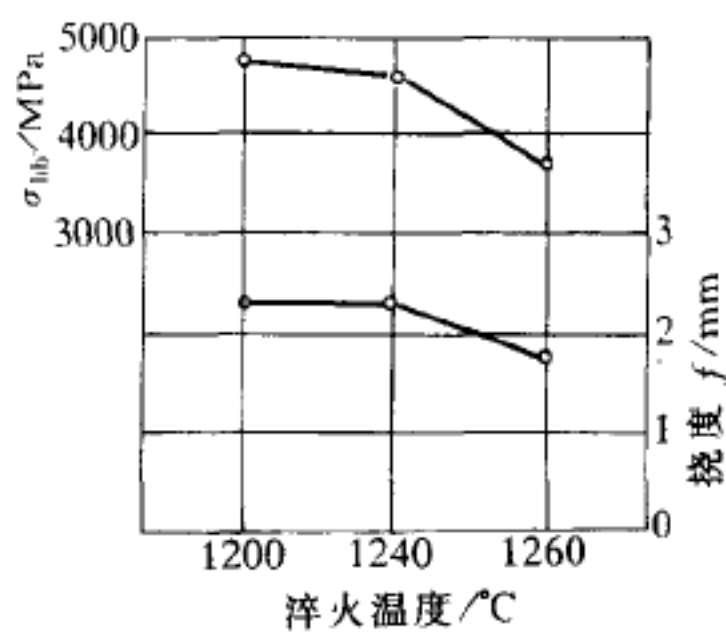


图 16-68 抗弯强度及挠度与淬火温度的关系

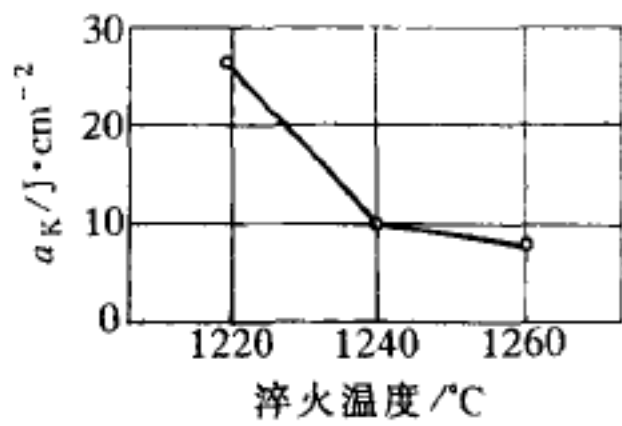


图 16-69 无缺口冲击韧度与淬火温度的关系
(560℃回火4次,每次1h)

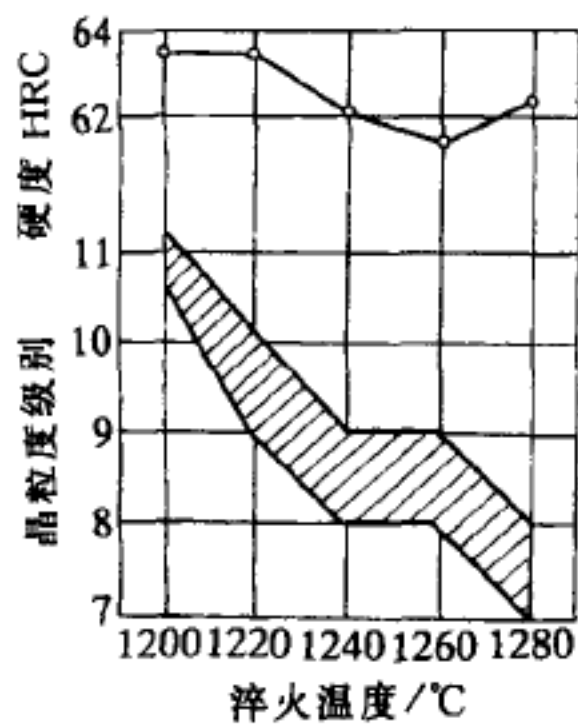


图 16-70 淬火硬度及奥氏体晶粒度与淬火温度的关系

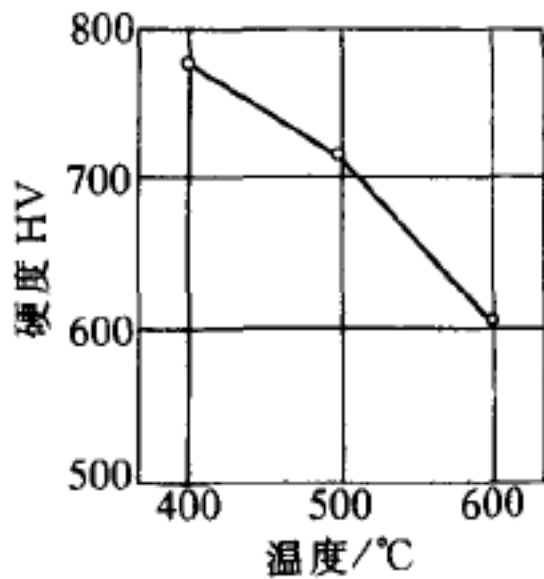


图 16-71 高温硬度曲线

表 16-30 热硬性

热 处 理 工 艺	625℃加热 4h 后硬度 HRC
1220℃油淬, 560℃回火 4 次, 每次 1h	61.0
1240℃油淬, 560℃回火 4 次, 每次 1h	64.0

7) W10Mo4Cr4V3Al(表 16-31,图 16-72 ~ 图 16-76)

表 16-31 热硬性

热 处 理 工 艺	625℃加热 4h 后硬度 HRC
1220℃油淬, 560℃回火 4 次, 每次 1h	63.0
1240℃油淬, 560℃回火 4 次, 每次 1h	64.2

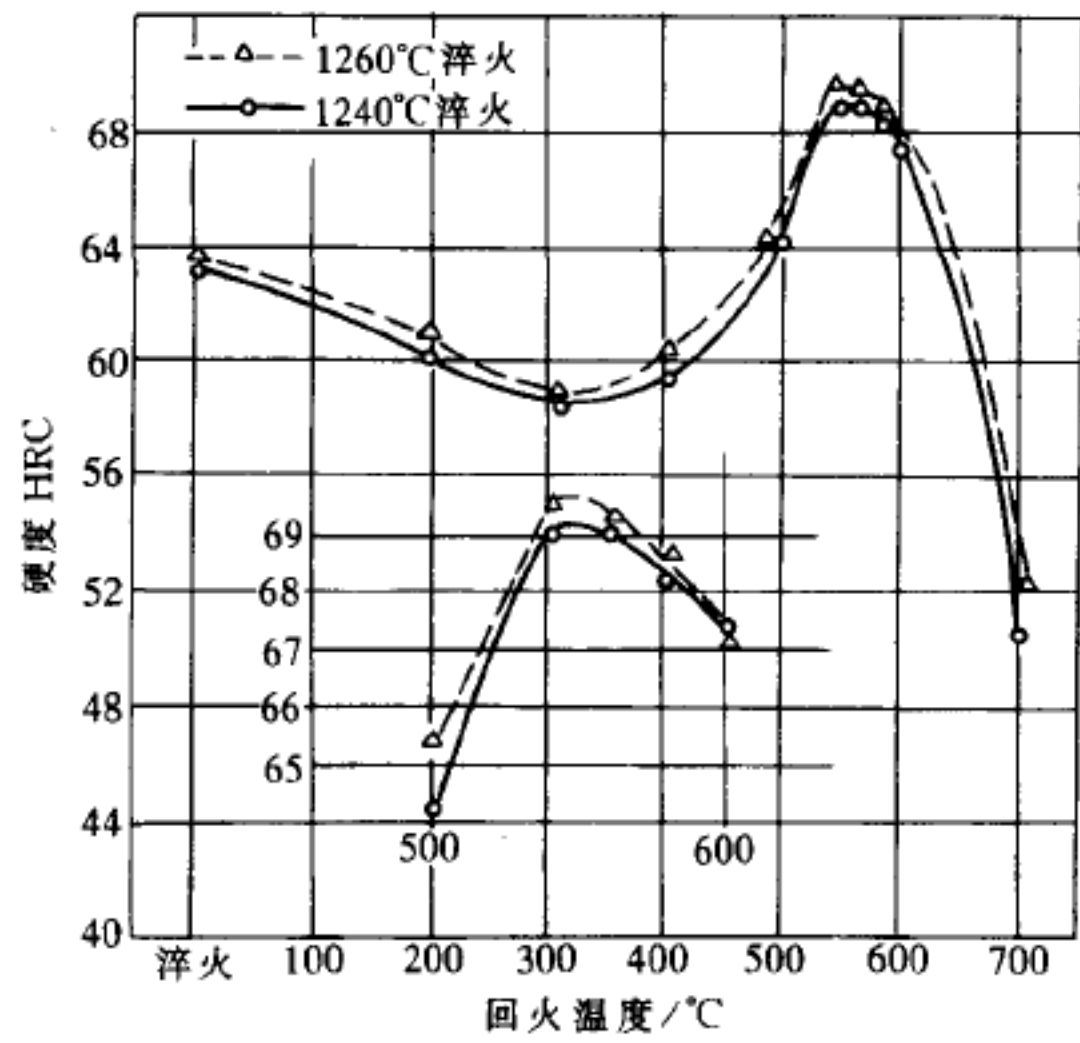


图 16-72 回火硬度曲线

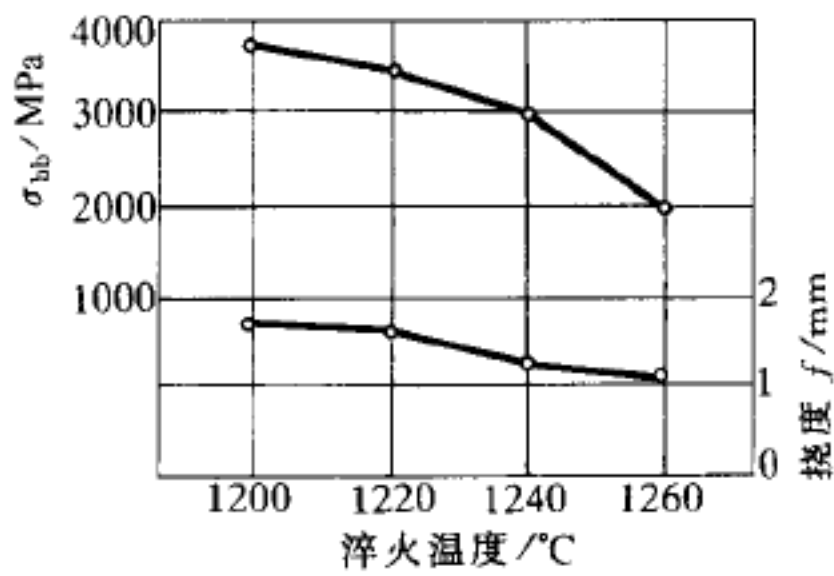


图 16-73 抗弯强度及挠度与
淬火温度的关系
(560°C 回火 4 次, 每次 1h)

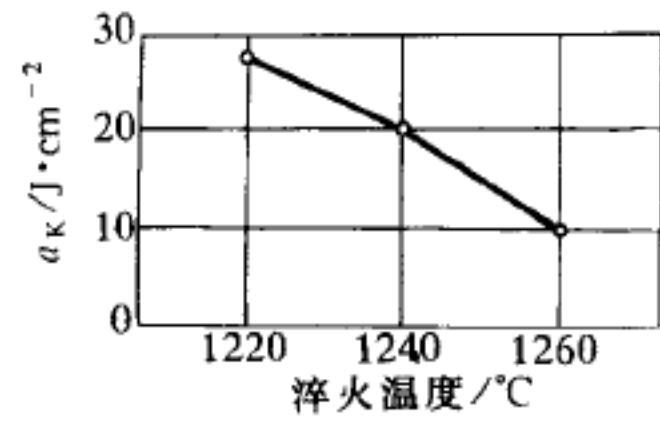


图 16-74 无缺口冲击韧度
与淬火温度的关系
(560°C 回火 4 次, 每次 1h)

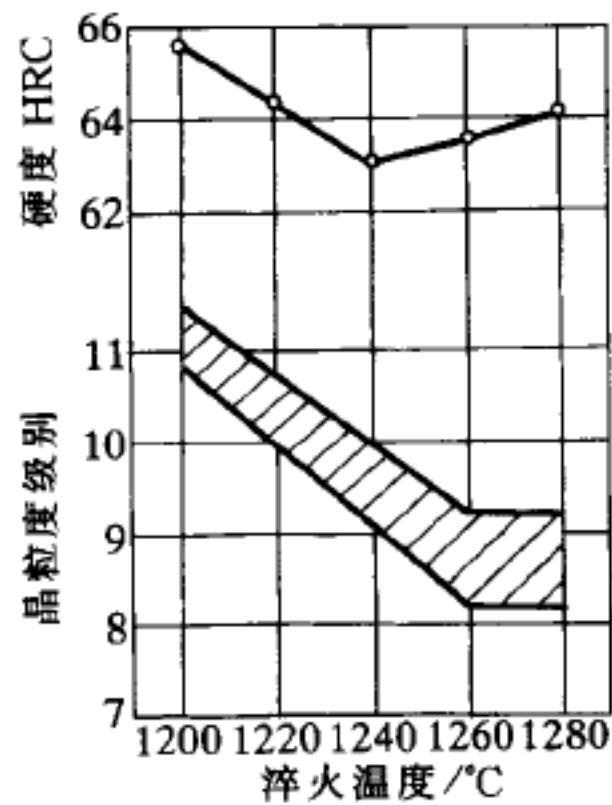


图 16-75 淬火硬度及奥氏体晶粒
度与淬火温度的关系

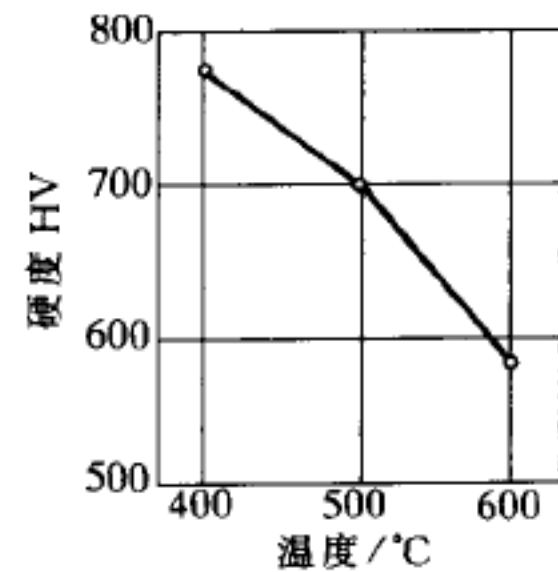


图 16-76 高温硬度曲线

8) W2Mo9Cr4V2(图 16-77 ~ 图 16-80,表 16-32)

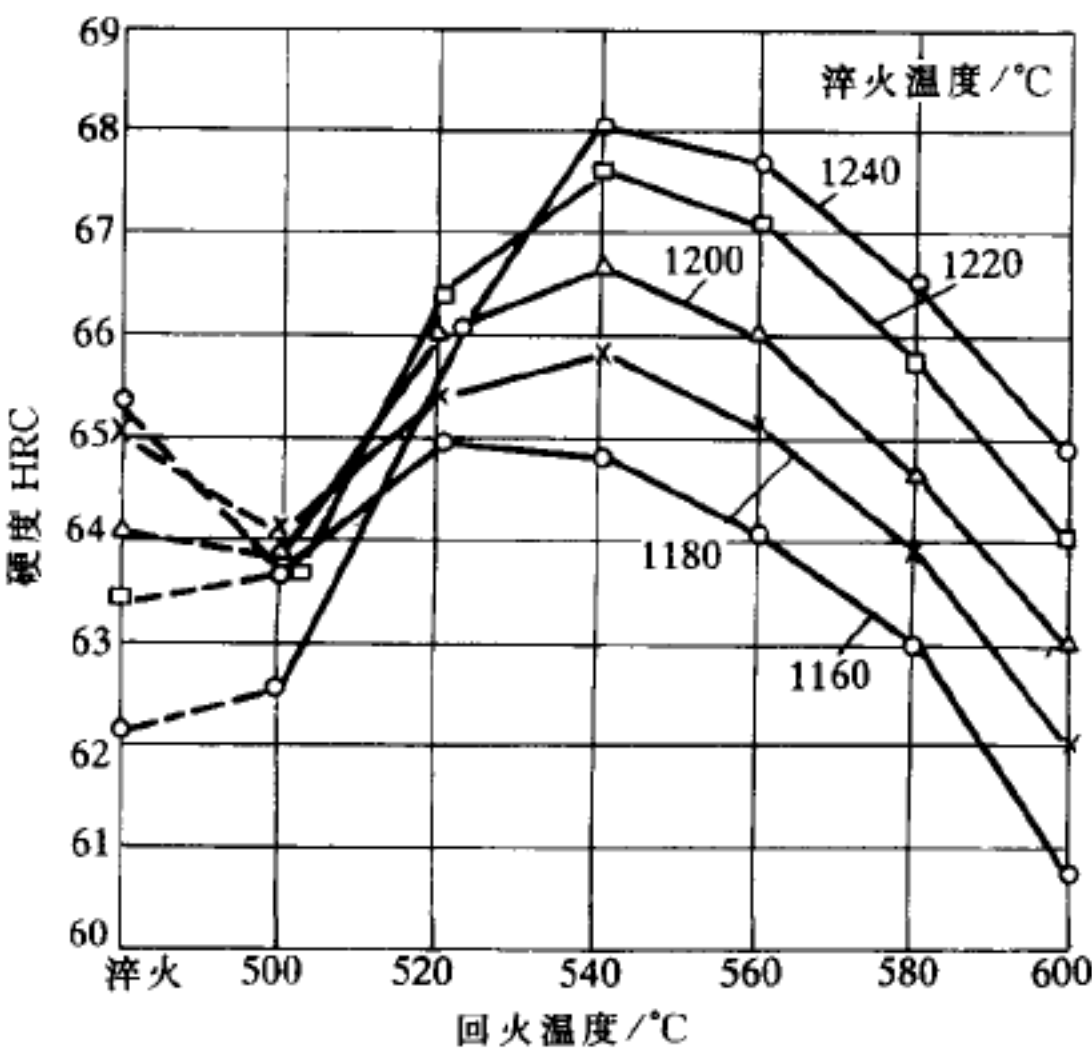


图 16-77 不同温度淬火后的回火硬度曲线

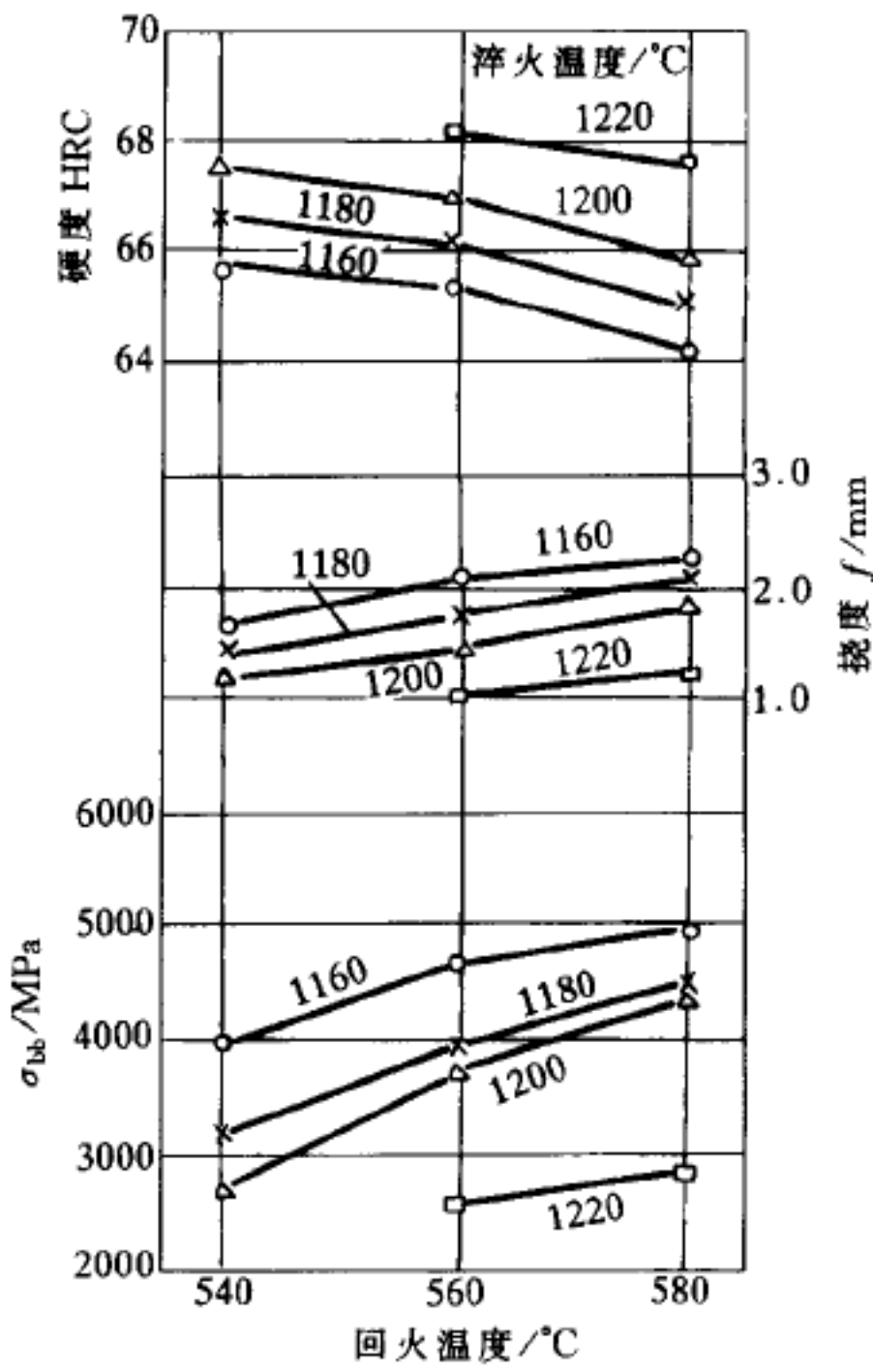


图 16-78 淬回火温度对抗弯强度及挠度的影响
(回火 2 次每次 1h)

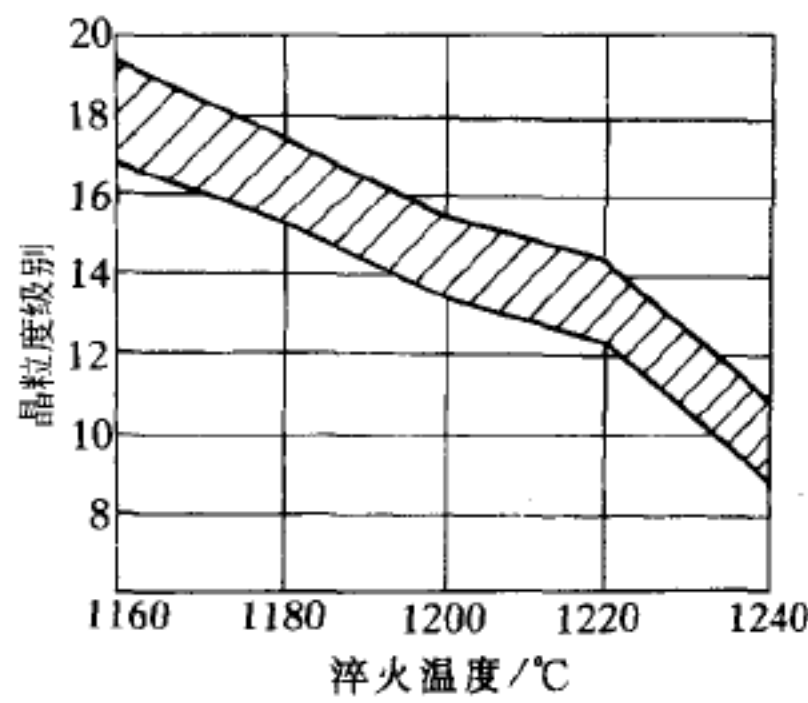


图 16-79 淬火温度与晶粒度的关系

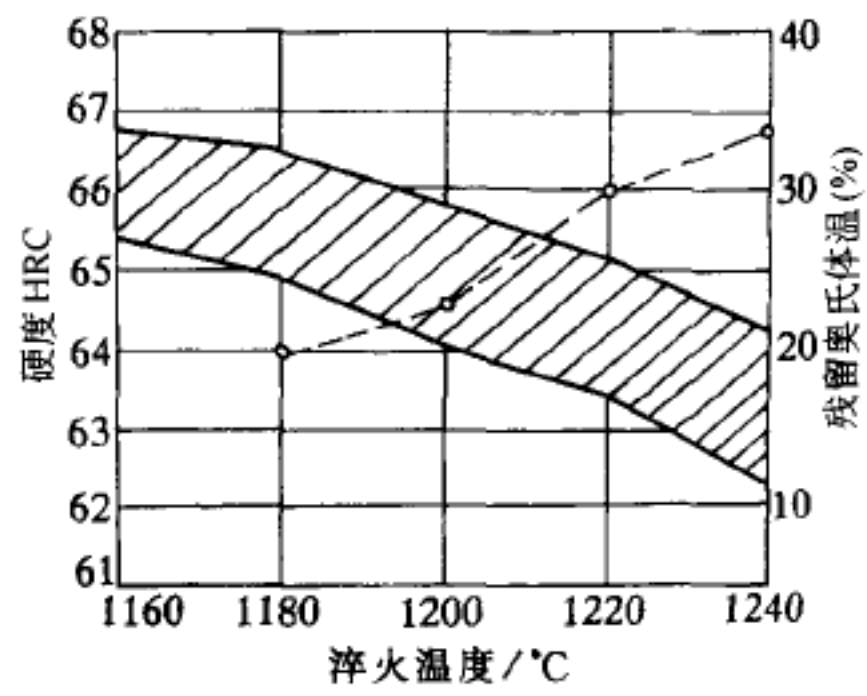


图 16-80 不同温度淬火的硬度与残留奥氏体量

表 16-32 抗扭强度

热 处 理 工 艺		硬 度 HRC	τ /MPa	扭转角度 (°)
淬火/℃	回火/℃			
1200	540	66.7	1860	60
	560	66.3	1820	70
1220	540	66.9	1700	51
	560	66.8	1640	64

9) W6Mo5Cr4V3(图 16-81 和图 16-82)

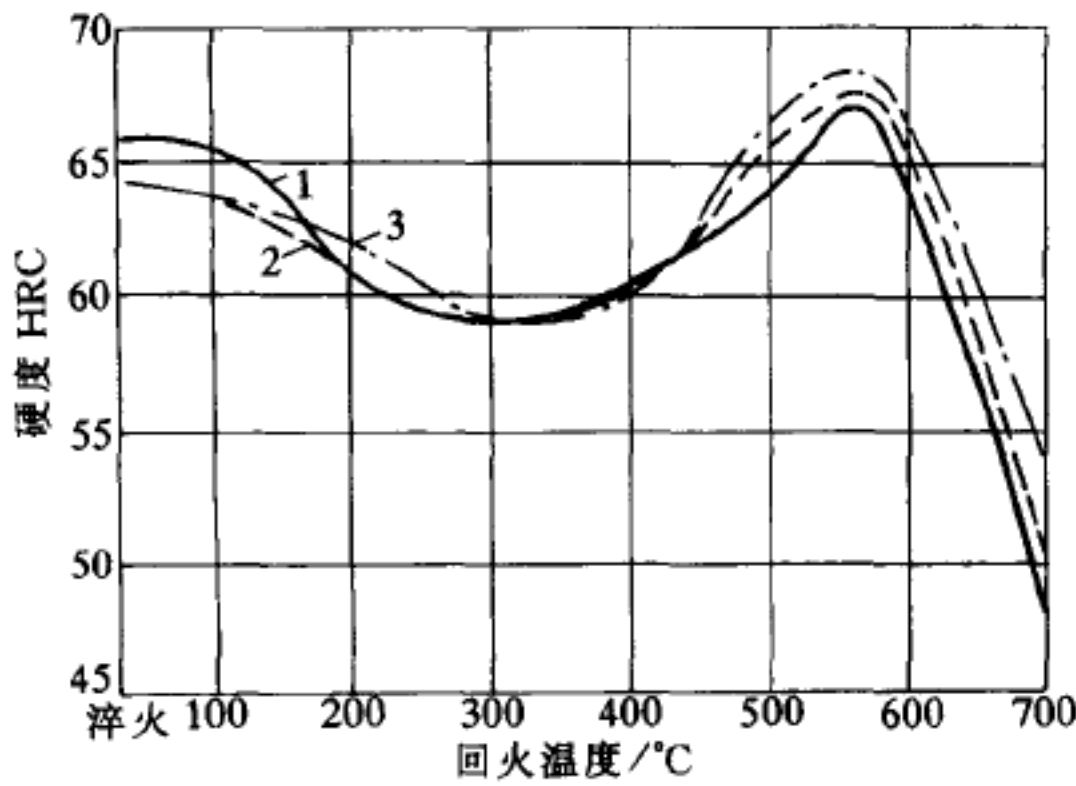


图 16-81 回火硬度曲线

1—1210℃油淬 2—1230℃油淬 3—1240℃油淬

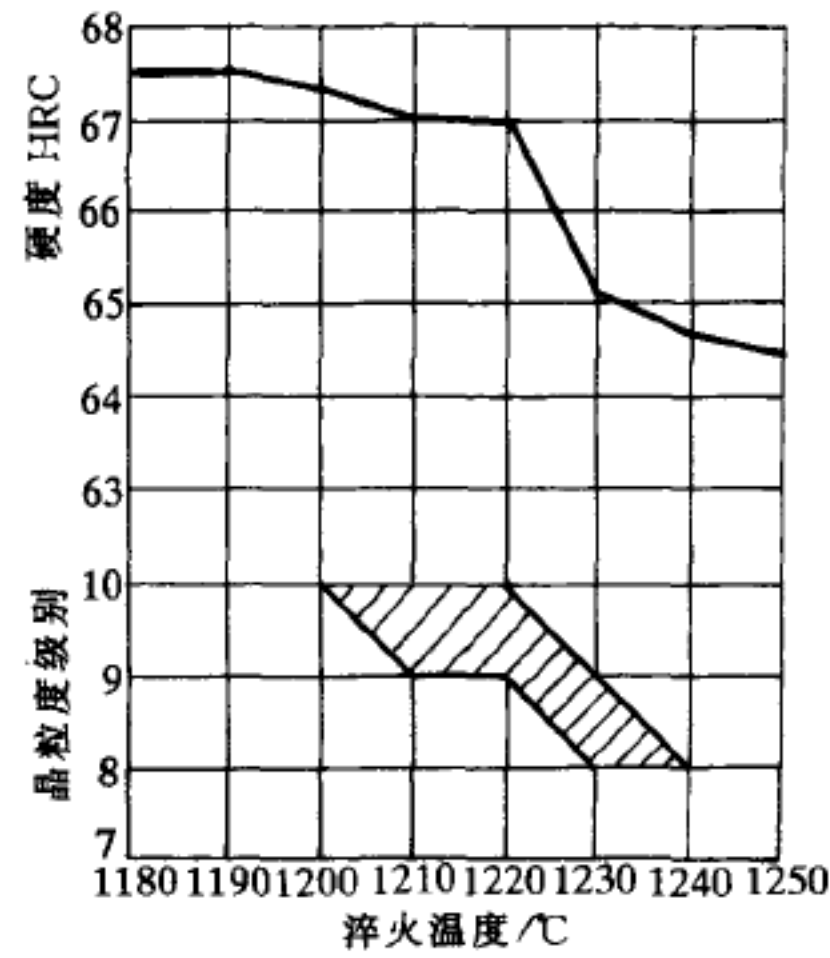


图 16-82 淬火硬度及奥氏体晶粒度与淬火温度的关系

10) W6Mo5Cr4V2Co5(图 16-83 和图 16-84)

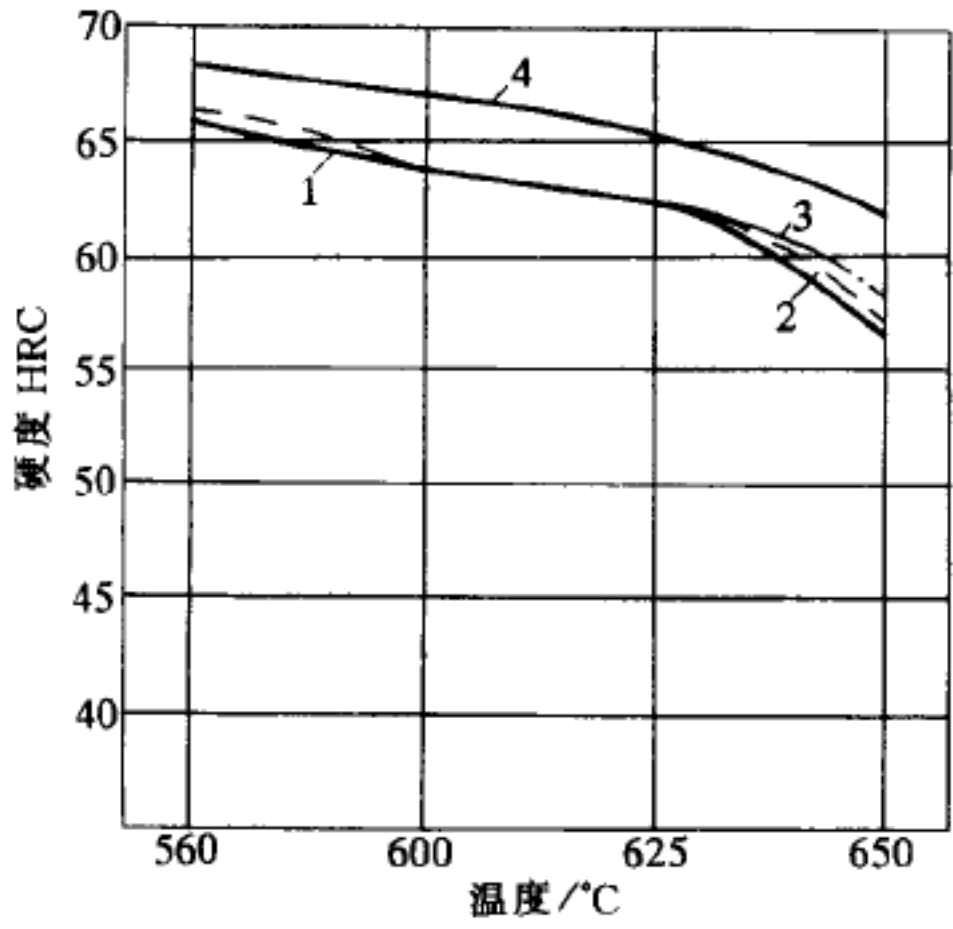


图 16-83 不同温度淬火后在
600、625、650℃下的热硬性
1—1200℃油淬 2—1220℃油淬
3—1240℃油淬 4—1260℃油淬

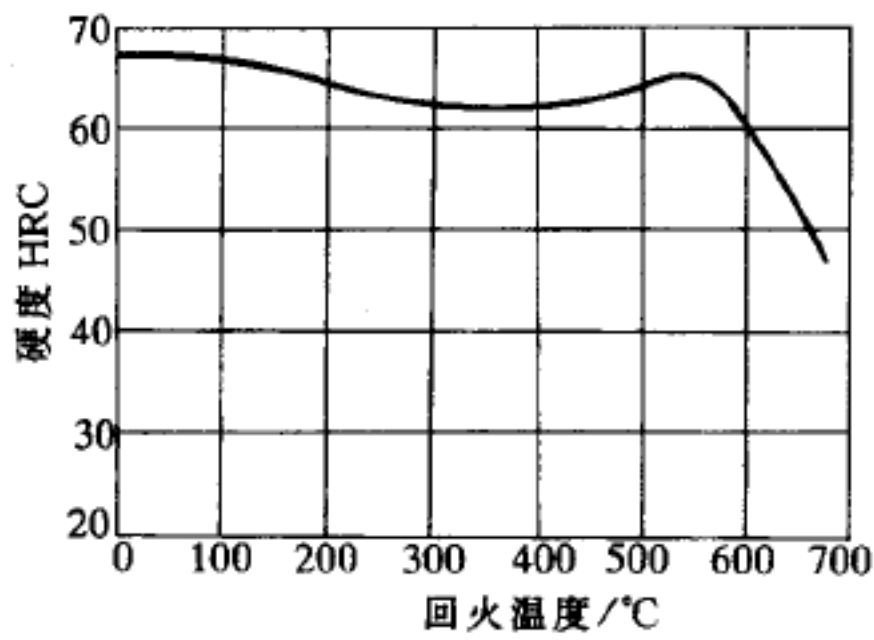


图 16-84 回火硬度曲线
(1225℃油淬)

11) W12Cr4V5Co5(图 16-85 ~ 图 16-88)

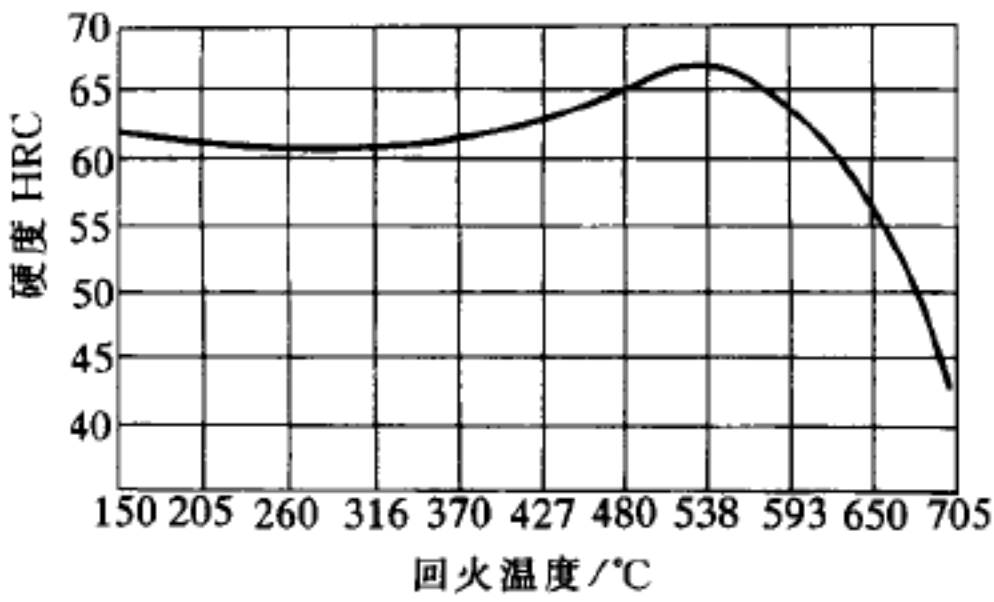


图 16-85 回火硬度曲线
淬火温度 1245℃, 回火 2 次, 每次 2h

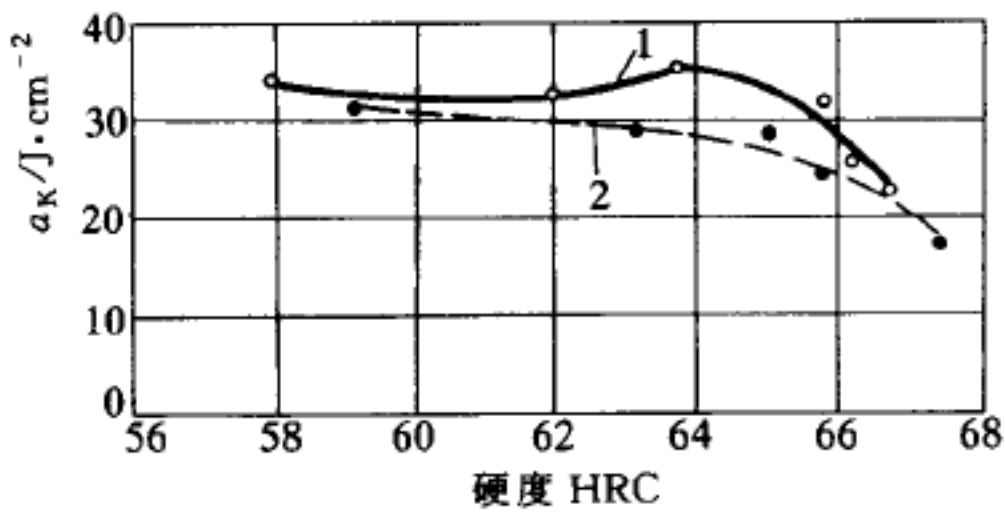


图 16-86 无缺口冲击韧度(艾氏)与硬度的关系
1—1225℃淬火 2—1250℃淬火

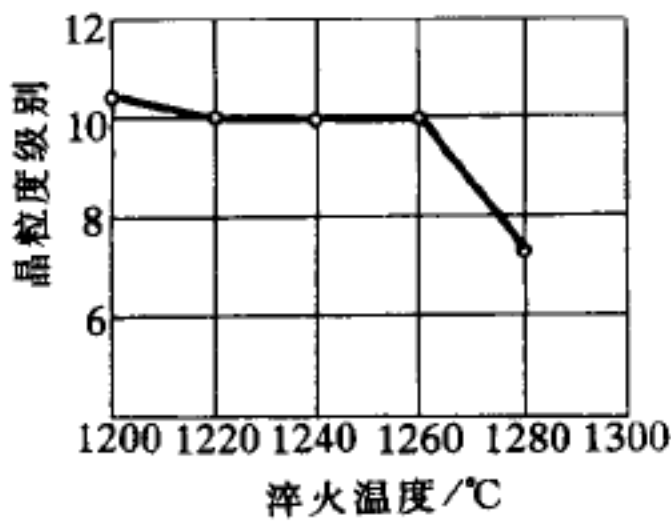


图 16-87 晶粒度与淬火温度的关系

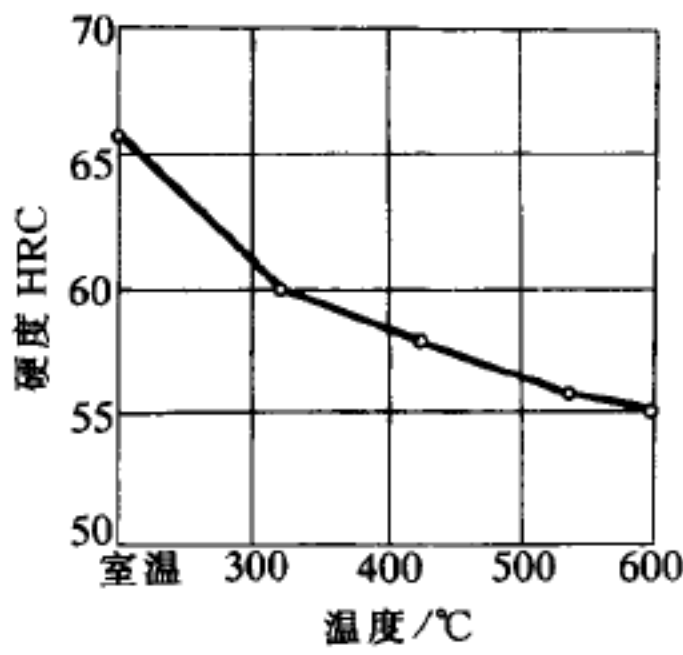


图 16-88 高温硬度
1245℃油淬, 565℃回火 3 次, 每次 2h

12) W2Mo9Cr4VCo8(图 16-89 ~ 图 16-93)

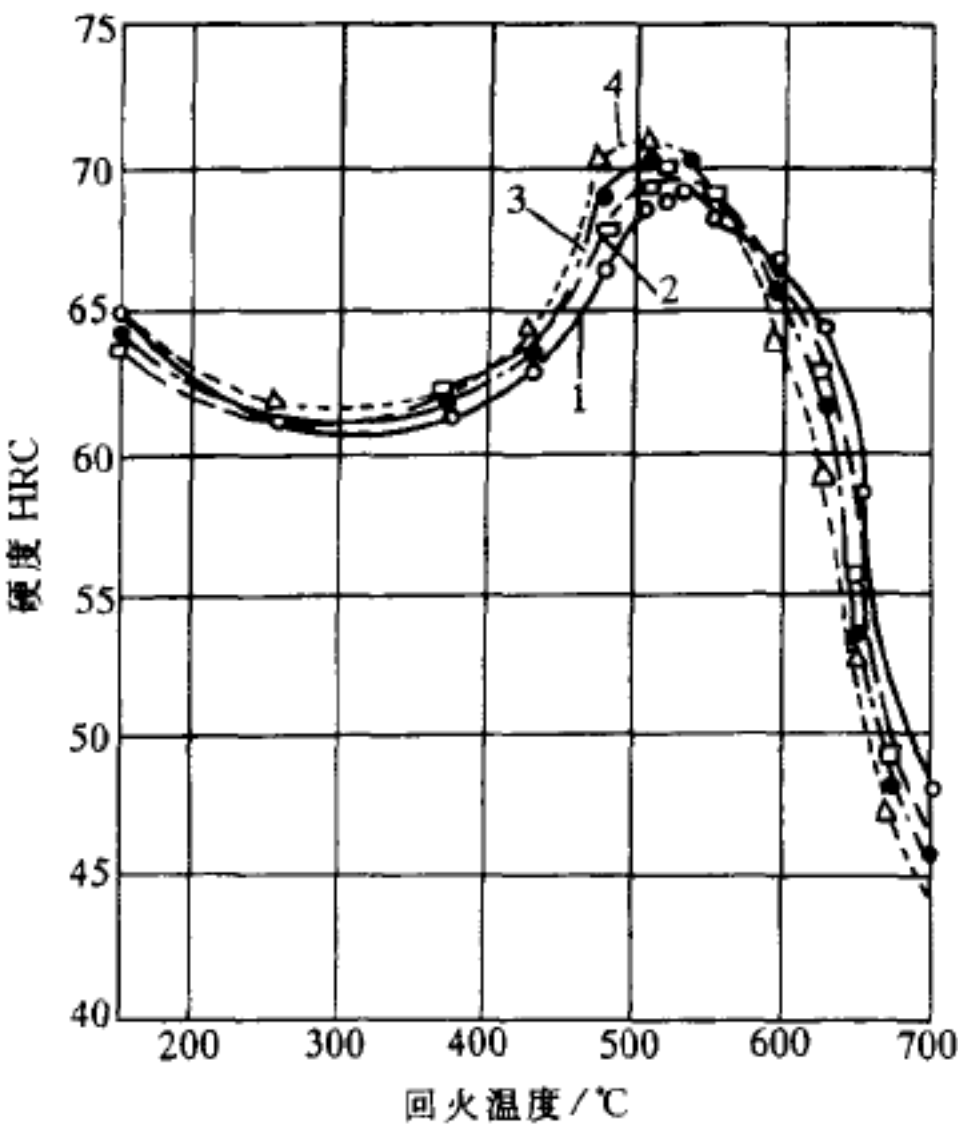


图 16-89 不同温度淬火后的回火硬度曲线
1200℃淬火: 1—1 次回火 2—2 次回火 3—3 次回火 4—4 次回火

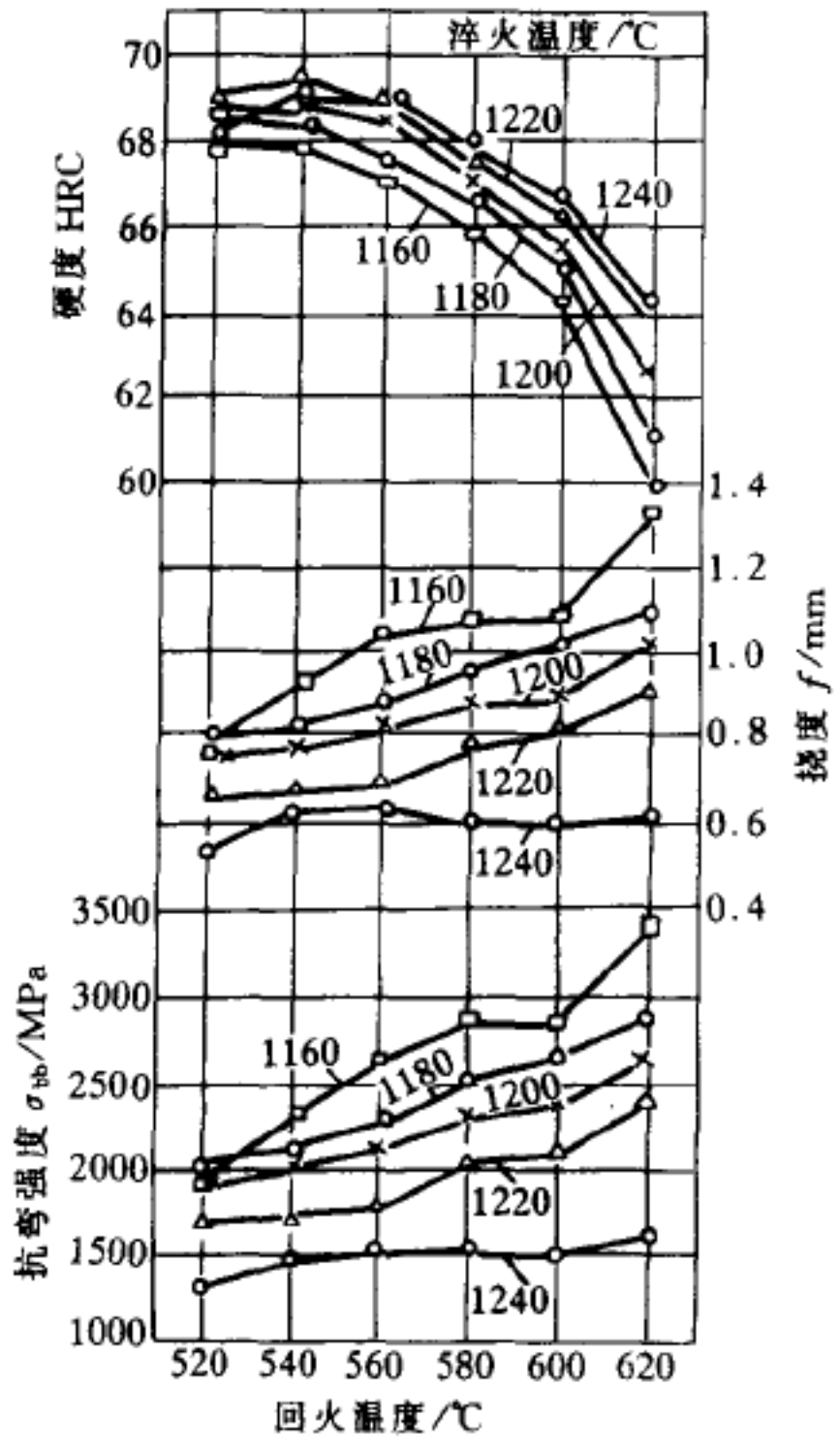


图 16-90 不同温度淬火后抗弯强度、挠度及回火硬度与回火温度的关系
(回火 3 次, 每次 1h)

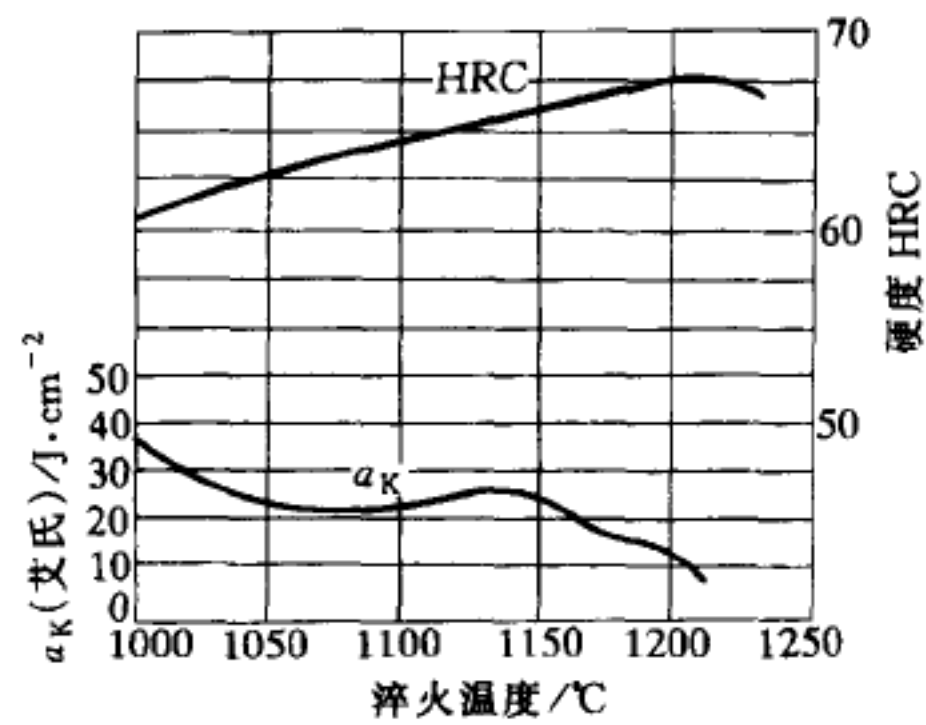


图 16-91 无缺口冲击韧度 (艾氏)、硬度与淬火温度的关系
(淬火后 540℃回火)

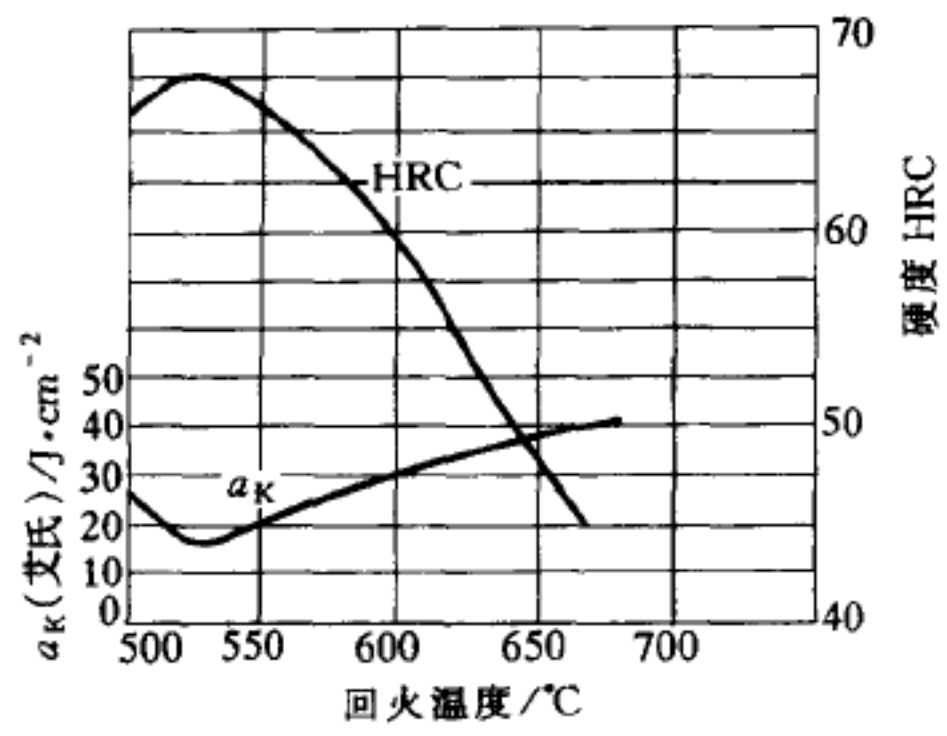


图 16-92 无缺口冲击韧度 (艾氏)、硬度与回火温度的关系 (1180℃淬火)

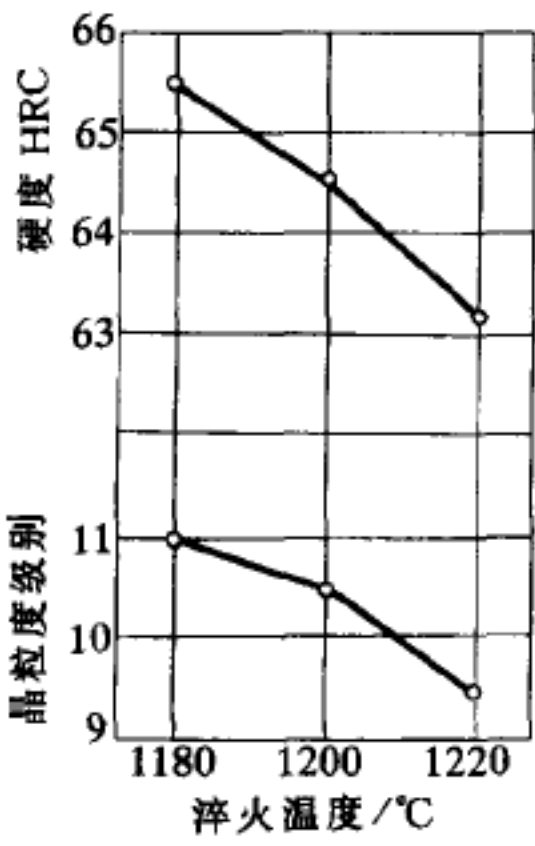


图 16-93 硬度及奥氏体晶粒度与淬火温度的关系

4. 工具热处理举例(表 16-33,图 16-94 ~ 图 16-96)

表 16-33 常用工具热处理工艺

工具名称	材料及技术要求	热 处 理 工 艺
锉刀	材料:T12 硬度:刃部 64~67HRC 柄部≤35HRC 淬硬深度:齿尖以下>1mm 畸变:弯曲<0.1mm/100mm	淬火:750~790℃盐浴加热,低于30℃的盐水或清水中冷却,180~200℃热矫直 回火:160~180℃,45~60min
手用锯条	材料:T10、T12 硬度:齿部 82.5~84.5HRA 销孔处:<74HRA 畸变:侧面弯曲<1.2mm 平面弯曲<1.5mm	淬火:650~720℃预热,770~790℃加热,油淬(加热时采用夹具可减少侧弯) 回火:175~185℃,45min(回火时采用夹具压紧可减小平面弯曲) 销孔处理:550~650℃,5~10s回火
手用丝锥	材料:T12A 刃部硬度: M1~3丝锥 59~61HRC M3~8丝锥 60~62HRC >M8丝锥 61~63HRC 柄部硬度:30~45HRC	淬火:600~650℃预热,770~790℃加热,淬火冷却方法: 1. ≤M12,200~220℃硝盐等温30~40min 2. M12~25,180℃碱浴分级后在硝盐中等温 3. >M25,水油双介质淬火 回火:180~220℃,90~120min 柄部处理:600℃,10~60s,水冷
圆板牙	材料:9SiCr 硬度:60~63HRC	淬火:600~650℃预热,850~880℃加热,等温淬火冷却规范: 1. M1~2.5,160~170℃,30~45min 2. M3~5,170~180℃,30~45min 3. M6~9,180~190℃,30~45min 4. M10~15,190~200℃,30~45min 5. M16~24,200~210℃,30~45min 回火:190~200℃,90~120min
手用铰刀	材料:9SiCr 硬度:φ3~8,62~64HRC >φ8,63~65HRC 柄部硬度:30~45HRC 弯曲畸变量:0.15~0.3mm	淬火:600~650℃预热,850~870℃加热,160~180℃硝盐冷却(φ3~13)或≤80℃油冷(φ13~50),热矫直 回火:160~180℃,90~120min 柄部处理:600℃,20~40s,水冷

(续)

工具名称	材料及技术要求	热 处 理 工 艺
搓 螺 纹 板	材料:9SiCr 或 Cr12MoV 硬度:齿部以下 3~5mm 为 58~61HRC	盐浴炉热处理工艺(9SiCr) 淬火 600~650℃ 预热, 860~870℃ 加热, $\leq M6$, 170~180℃ 硝盐冷却, > M6, $\leq 80^\circ\text{C}$ 油冷 回火: 210~230℃, 2~3h 真空炉热处理工艺(Cr12MoV) 淬火: 850℃ × 10min 一次预热 (0.1333Pa), 980℃ × 10min 二次预热 (1.33Pa), 1050℃ × 10min 加热 (13.33Pa), 油冷 回火: 170℃ × 1.5h, 2 次
圆 滚 模	材料:Cr12MoV 硬度:59~62HRC	真空加热淬火: 800~850℃, 60s/mm 预热; 1020~1040℃, 40~60s/mm 加热; 充氮冷却 ($8.1 \sim 8.8 \times 10^4 \text{ Pa}$), $\leq 180^\circ\text{C}$ 出炉 回火: 一次 200~220℃ × 3h, 二次 180~200℃ × 2h
车 刀	材料:W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2 等 硬度: $\geq 64\text{HRC}$ 弯曲允许量: 0.15~0.30mm	淬火: 850℃ 预热, 1290~1310℃ (W18Cr4V) 或 1235~1250℃ (W6Mo5Cr4V2) 加热; 油冷或在 580~620℃ 的盐浴中等温冷却, 对厚度 $\leq 12\text{mm}$, 长度达 205mm 的刀具, 可在 240~280℃ 保温 1.5~2h 进行分 级淬火, 以减少畸变 回火: 560℃ × 1~1.5h 回火 3 次
拉 刀	材料:W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2 等 硬度: 齿部: 63~67HRC 导向部分: $\geq 50\text{HRC}$ 柄部: 40~52HRC 偏摆允许量: 0.25~0.40mm	淬火: 550~600℃ 低温预热 (直径 $\geq 60\text{mm}$ 时), 800~870℃ 中温预热, 1260~1270℃ (W18Cr4V) 或 1205~1225℃ (W6Mo5Cr4V2) 加热; 几种淬 火冷却方法如下: 1. 60~120℃ 的油中冷却 2. 580~620℃ 氯化盐中分级, 待拉刀表面温度冷到 650~700℃ 时, 转 入 240~280℃ 硝盐中等温, 对直径较大的拉刀 ($\geq \phi 70\text{mm}$), 采用二次等 温, 即 450~550℃ 和 240~280℃ 3. 分段冷却后, 在 240~280℃ 等温 3h, 空冷至室温 回火: 550~570℃ × 1~3h 回火 3 次 (长时间等温冷却的刀具应回火 4~5 次), 回火应在淬火冷至室温后及时进行, 大型刀具在冷至室温前 (150℃ 左右) 即应回火, 回火次数应增加到 4 次 柄部处理: 890~910℃, 保温 12~18s/mm, 油冷或 250℃ 硝盐冷却
齿 轮 刀 具	材料: 高速钢 硬度: 一般高速钢为 63~66HRC 高性能高速钢为 65~68HRC	盐浴炉热处理: 齿轮刀具的热处理与一般高速钢刀具基本相同, 为 避免开裂和稳定尺寸可采取如下措施: 1. 采用下限淬火温度, 如 1265~1275℃ (W18Cr4V), 或 1210~1220℃ (W6Mo5Cr4V2) 2. 等温处理, 大型刀具经多次分级冷却后, 于 240~280℃ 等温 2~ 4h。对容易开裂的刀具, 应在第一次回火加热后, 立即转入等温槽进 行等温处理, 其方法与淬冷等温处理相同 3. 第一次或第二次回火后进行 $-70 \sim -80^\circ\text{C} \times 60\text{min}$ 的冷处理 4. 为稳定尺寸、刀具磨削后于 500℃ 1h 回火或 200℃ 2h 回火 真空炉热处理 (W6Mo5Cr4V2): 淬火: 800℃ × 20min 预热, 1000℃ × 20min 预热, 1220℃ × 25min 加热, 充氮 (压力: $50 \times 10^4 \text{ Pa}$) 冷却 回火: 抽真空后充 $6.7 \times 10^4 \text{ Pa}$ 氮气, 550~570℃ × 2h, 回火 3 次

(续)

工具名称	材料及技术要求	热 处 理 工 艺
小型高速钢刀具	材料: W6Mo5Cr4V2、W18Cr4V 等 硬度: 62 ~ 65HRC	淬火: 1200 ~ 1220℃ × 40 ~ 80s (W6Mo5Cr4V2) 或 1250 ~ 1270℃ × 40 ~ 60s (W18Cr4V) 加热, 盐浴分级淬火或空冷 回火: 560 ~ 580℃ × 1 ~ 1.5h, 回火 3 次

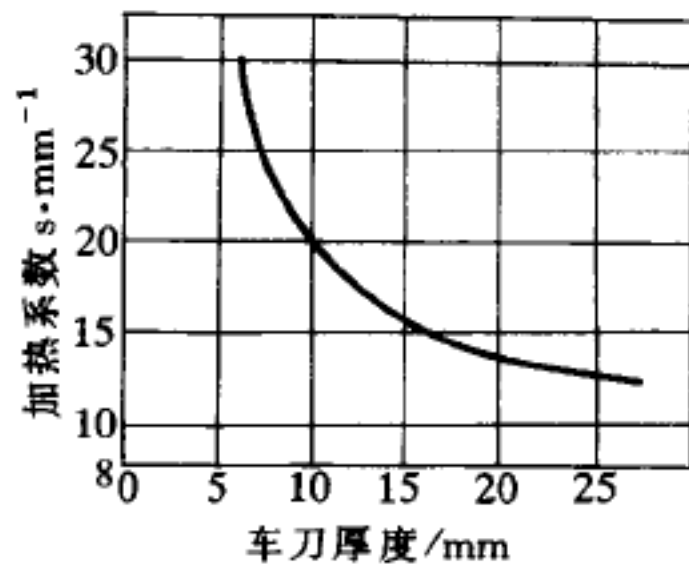


图 16-94 车刀淬火加热系数

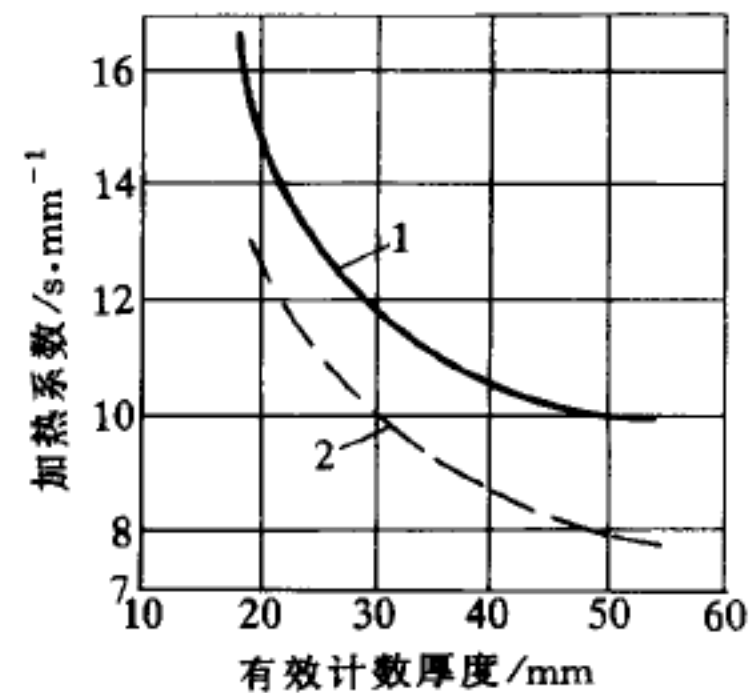


图 16-95 大规格齿轮刀具加热系数

1—盘形刀具 2—筒体刀具

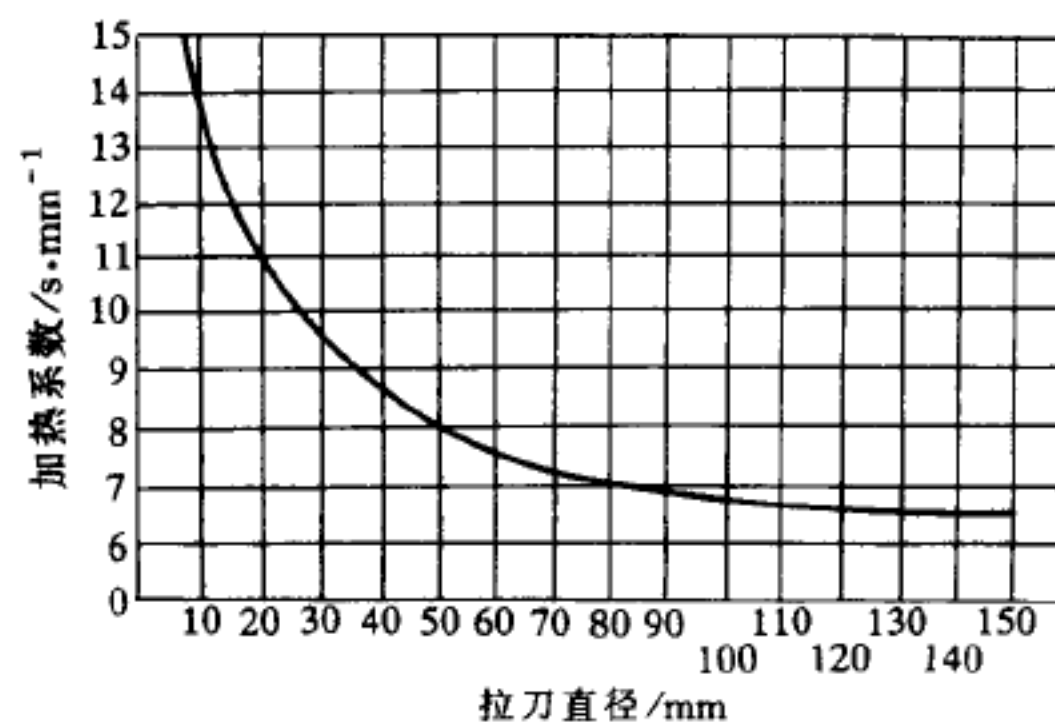


图 16-96 拉刀淬火加热系数

16.3 量具的热处理(表 16-34 ~ 表 16-40)

表 16-34 量具常用钢种及其特点

钢 号	用 途 举 例	特 点
GCr9	中、小型高精度量规及量具零件	1. 碳化物颗粒均匀细小, 退火及淬火硬度均匀 2. 硫含量低, 夹杂物少 3. 经适当热处理后尺寸稳定性好 4. GCr9 淬透性尚好, GCr15 较好, GCr15SiMn 淬透性更好
GCr15 (Cr2)	各种量规、量块及其他高精度量具零件, 如千分尺螺纹量杆、正弦规工作台及滚柱等	
GCr15SiMn	尺寸较大或厚实的高硬度、高精度的量具零件和量规如石油量规、正弦规工作台等	
CrWMn	要求高硬度、高耐磨性的量规和量具零件	1. 淬火硬度高, 耐磨性好, 淬透性好 2. 碳化物细小, 淬火后晶粒细 3. 退火易生成碳化物网, 磨削性较差, 磨削时较易出现裂纹 4. 退火硬度较高

(续)

钢 号	用 途 举 例	特 点
9Mn2V	要求淬火畸变小、量规、卡板及其他一般量具	1. 淬火畸变小, 淬透性好 2. 淬火硬度稍低于其他合金工具钢
9Cr18MoV	耐磨及耐锈蚀的量具零件(如百分表量杆等)	1. 抗锈蚀性好、耐磨性好 2. 碳化物分布不均匀 3. 可加工性及抛光性尚好
3Cr13 4Cr13	耐磨及抗锈蚀的量规及量具零件(如卡尺尺身、尺框等, 亦可用于渗氮量块)	1. 抗锈蚀性好、耐磨性好、淬火回火后硬度低于9Cr18MoV 2. 碳化物分布较均匀 3. 可加工性及抛光性好
T8A T10A	尺寸不大, 具有一定韧性和耐磨性的量具零件(如卡尺尺身尺框、宽座角尺长边, 百分表销子等)	1. 价格便宜, 退火硬度低、可加工性好, 磨削及抛光性好 2. 随碳含量升高、耐磨性也提高
T12A	尺寸不大, 高耐磨性的量具零件(如百分表齿轮, 下轴套等)	3. 淬透性低, 淬火易出现软点, 淬火畸变大, 耐磨性不如含铬钨等元素的合金工具钢
65Mn	卡尺平弹簧、卡尺深度尺及其他量具用弹性零件	1. 价格便宜 2. 容易过热
45	中硬度量具零件(如千分尺微分筒体, 螺纹轴套, 百分表上轴套等)	1. 价格便宜, 容易购得 2. 可加工性好, 热处理容易 3. 耐磨性稍差, 韧性较好

表 16-35 常用量具钢的淬火及回火温度

钢 号	淬火温度/℃	常用冷却介质	淬火后硬度 HRC	回火温度/℃	回火后硬度 HRC
GCr9	820 ~ 850	油、硝酸盐、碱浴	62 ~ 66	130 ~ 170	62 ~ 65
GCr15	830 ~ 860	油、硝酸盐、碱浴	62 ~ 66	130 ~ 170	62 ~ 65
GCr15SiMn	820 ~ 850	油、硝酸盐、碱浴	62 ~ 66	130 ~ 170	62 ~ 65
CrWMn	820 ~ 850	油、硝酸盐、碱浴	62 ~ 66	130 ~ 170	62 ~ 65
9Mn2V	780 ~ 810	油、硝酸盐、碱浴	≥ 62	130 ~ 170	≥ 60
T8A	750 ~ 780	水、硝酸盐、碱浴	62 ~ 65	130 ~ 150	≥ 62
T10A	760 ~ 790	水、硝酸盐、碱浴	62 ~ 65	130 ~ 160	≥ 62
T12A	760 ~ 790	水、硝酸盐、碱浴	62 ~ 65	130 ~ 160	≥ 62
9Cr18MoV	1050 ~ 1070	油	> 55	200 ~ 300	53 ~ 58
				550 ~ 580	43 ~ 46
65Mn	790 ~ 820	水、油	> 56	300	52
				400	45
				500	37

表 16-36 百分表零件热处理举例


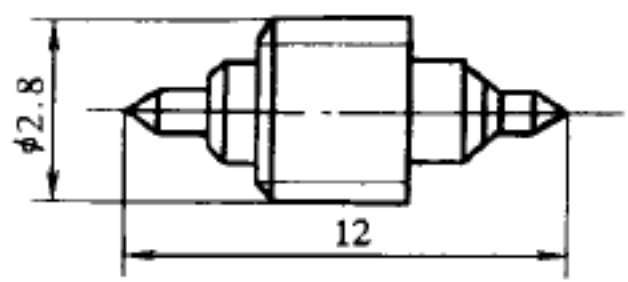
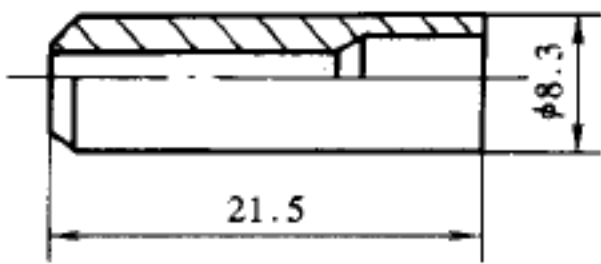
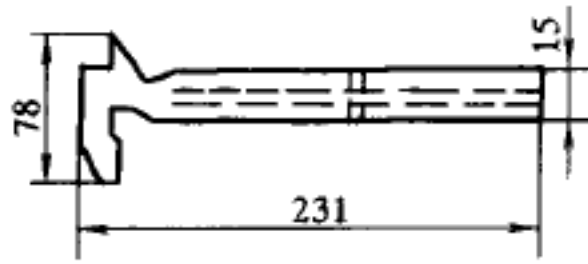
零件名称	零件简图及技术条件	热处理流程	热处理工艺	备 注
测杆	 <p>材料: 9Cr18 要求硬度: 53 ~ 57HRC 弯曲度: $\leq 0.05\text{mm}$</p>	清洗→淬火 →回火→清洗 →矫直→稳定 化处理→清洗	淬火(真空炉): 清洗工件后 送入 1050 ~ 1060℃ 炉中, 保温 40min(真空度 13.33 ~ 1.33Pa) 通氮冷却 回火: 在电炉中加热至 200 ~ 250℃, 保温 4h 稳定化处理: 在电炉中加热 至 180 ~ 220℃ 保温 4h	淬火夹具应 能保持测杆直 立, 相互间有一 定间隔, 使加热 均匀, 减少弯 曲, 夹具使用前 应清除一切污 物, 保证清洁
轴齿轮	 <p>材料: 2Cr13Ni2 要求硬度: 50 ~ 55HRC</p>	清洗→淬火 →回火→清洗	淬火(真空炉): 工件用汽油 洗净, 装在洁净的不锈钢小盘 中, 允许重叠, 但不可堆放过 厚, 在 1050 ~ 1060℃ 保温 60 ~ 80min, 真空度为 13.33 ~ 1.33Pa, 保温后通氮冷却 回火(油槽): 140 ~ 160℃ × 2h, 回火后用汽油洗净	
下轴套	 <p>材料: Ti2A 要求硬度: 58 ~ 62HRC 淬火马氏体级别 ≤ 2.5 级</p>	淬火→热水 洗→回火→清 洗→喷砂	淬火(盐浴): 650 ~ 700℃ 预 热 7min 再加热至 780 ~ 800℃ 保温 7min, 均匀分散地撒入油 中冷却 回火(盐浴): 210 ~ 230℃ × 2h	

表 16-37 游标卡尺主要零件热处理举例

零件名称	零件简图及技术要求	热处理工艺流程	热处理工艺	备 注
卡尺 尺身	 <p>材料: T8A 或 4Cr13 测量面及距测量面 2mm 处硬度: 59 ~ 64HRC (T8A), 53 ~ 58HRC (4Cr13)除距测量面 2mm 处以外的 尺身硬度 40 ~ 48HRC 测量面淬火 马氏体级别 ≤ 3 级(T8A)弯曲度(平 面及侧面) $\leq 0.1\text{mm}$</p>	淬火→清洗 →回火(装夹 具压直)→高 频感应卡爪测 量面局部淬火 (淬大爪→清 洗→淬小爪) →回火→清洗 →矫直→稳定 化处理→清洗 →尺槽喷砂→ 防锈	淬火(盐浴): 650 ~ 700℃ 预热 6min(T8A) 或 9min(4Cr13)再加热到 800 ~ 810℃ (6min) 或 900 ~ 910℃ (9min), 加热后淬入 150 ~ 170℃ 硝盐浴中进行分级后, 空冷至室温或 油冷 回火(电炉)用专用夹具夹紧, 在 380 ~ 420℃ (T8A)或 250 ~ 300℃ (4Cr13)回火并 矫直 3h(T8A)或 4h(4Cr13) 高频感应淬火: 用专用感应器将大爪测 量部分局部加热至 860 ~ 900℃ (T8A)或 1100 ~ 1130℃ (4Cr13), 保温后送入 150 ~ 170℃ 硝盐浴中分级冷却, 清洗, 再用专用 感应器局部加热小爪测量部分(加热温度 同大爪), 再送入 150 ~ 170℃ 硝盐浴中分级 冷却 回火: 150 ~ 170℃ × 2h(盐浴)稳定化处 理: 凡经过冷矫直的尺身须在 150 ~ 170℃ 进行 2h 的稳定化处理	1. 盐浴淬火 后, 在专用夹具 上压紧回火矫 直, 如回火后仍 有弯曲超差者, 可进行一次冷 矫直, 然后补充 一次压紧回火 2. 为使高频 感应加热卡爪 局部淬硬, 达到 需要的淬硬深 度, 又不使卡爪 过热, 加热时应 多次断续送电

(续)

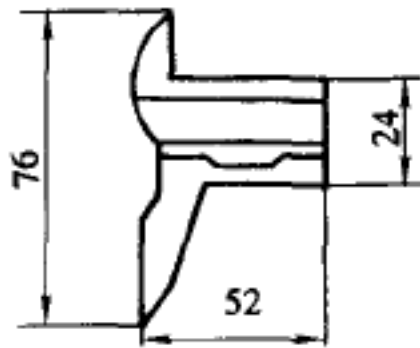
零件名称	零件简图及技术要求	热处理工艺流程	热处理工艺	备 注
卡尺 尺框	 <p>材料: T8A 或 4Cr13 技术要求: 同卡尺尺身</p>	大卡爪测量面进行局部高频感应淬火→清洗→小卡爪测量面进行局部高频感应淬火→回火→清洗→防锈处理	同卡尺尺身高频感应加热卡爪测量面	

表 16-38 外径千分尺主要零件热处理举例

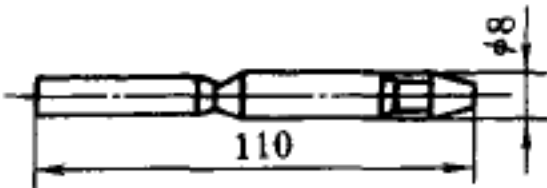
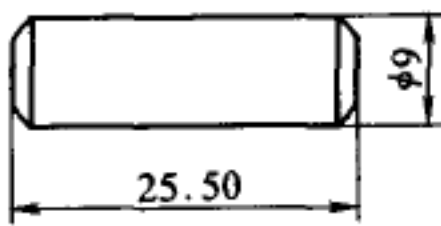
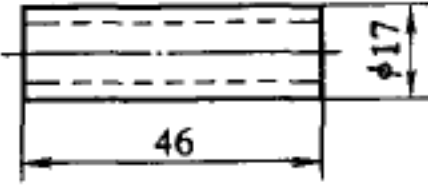
零件名称	零件简图及技术要求	热处理工艺流程	热处理工艺	备 注
螺纹 测杆	 <p>材料: GCr15 硬度要求: 58 ~ 62HRC 弯曲度: $\leq 0.15\text{mm}$ 淬火马氏体级别: ≤ 2 级</p>	淬火→回火→清洗→矫直→稳定化处理→清洗→磨削加工→端部焊硬质合金处喷砂→高频感应加热焊硬质合金测头	淬火(盐浴): 650 ~ 700℃ 预热 7min, 再加热到 850 ~ 860℃, 保温 7min, 淬入 200 ~ 220℃ 硝盐浴中进行分级 1min, 再取出空冷至室温 回火(盐浴): 190 ~ 210℃ × 2h 稳定化处理(盐浴), 160 ~ 180℃ × 2h	用专用夹具加热淬火 夹具设计应使工件直立, 相互间有足够间隙, 以尽量减少弯曲, 并保证淬火冷却均匀
校对 量柱	 <p>材料: GCr15 硬度要求: 62 ~ 65HRC 弯曲度: 根据不同长度量柱而定 淬火马氏体级别 ≤ 2 级</p>	淬火→清洗→深冷处理→回火→清洗→中间部分高频感应加热退火→矫直→稳定化处理→清洗	淬火(盐浴): 650 ~ 700℃ 预热 10min, 再加热到 850 ~ 860℃, 保温 10min 油淬, 进行热水冲洗→冷水冲洗后立即进行 -70 ~ -80℃ 冷处理 深冷处理: -70 ~ -80℃ 冷透, 保持 30 ~ 60min 回火(盐浴): 130 ~ 150℃ × 8h 中间部分退火(感应加热): 量柱中间部分局部加热到 700 ~ 800℃, 空冷	1. 长度 $\geq 75\text{mm}$ 的零件装在专用夹具上直立加热, 相互间有间隙, 每个夹具上装数十件, 以满足批量生产需要 2. 长度 $\geq 75\text{mm}$ 淬火后弯曲超差的中间局部退火以便矫直, 淬火弯曲在允许范围内的可免除局部退火及矫直、稳定化处理等工序
微分 筒体	 <p>材料: 45 钢 硬度要求: 170 ~ 207HBW</p>		铁丝扎成串, 在 860 ~ 880℃ 盐浴中加热 10min 后吹风冷却	

表 16-39 量块热处理举例

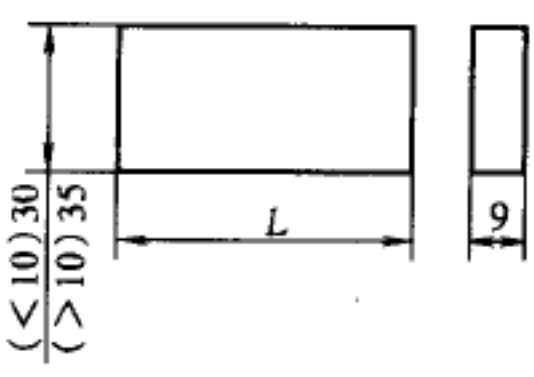
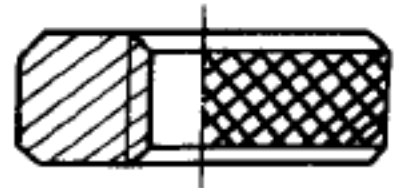
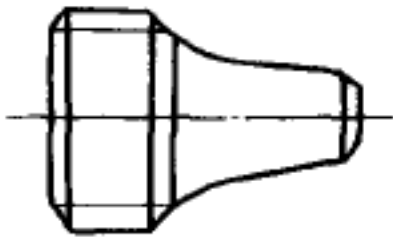
零件名称	零件简图及技术要求	热处理工艺流程	热处理工艺	备 注
淬火 量块	 <p>材料: GCr15 硬度要求: 64 ~ 66HRC 淬火马氏体级别 ≤ 2 级</p>	淬火→冷水冲洗→冷处理→回火(稳定化处理)→清洗→精磨及研磨→自然稳定化处理→精磨, 研磨	<p>淬火(盐浴): 650 ~ 700℃ 预热 17min, 再加热到 850 ~ 860℃, 保温 17min, 油淬</p> <p>深冷处理: -75 ~ -80℃ (丙酮或酒精中加入干冰) 或 -120℃ 以下(液氮挥发)冷透, 保持 30 ~ 60min</p> <p>回火: 在盐浴中加热到 120 ~ 130℃, 保持 48h</p> <p>自然稳定化处理: 经防锈处理后, 在室温存放半年</p>	<p>1. 为获得高的尺寸稳定性和均匀的高硬度, 可在最终淬火前增加 1050℃ 加热油淬后, 再进行 450 ~ 500℃ 的预处理, 凡经这种预处理的量块, 最终淬火温度应比未经预处理器稍低</p> <p>2. 10mm 以下量块批量生产时, 可用勺装加热, 但油淬时, 应保证分散均匀地冷却, 20 ~ 100mm 量块可用铁丝单个绑扎成串加热及淬冷</p> <p>3. 淬冷到室温后应立即进行冷处理, 采用冷处理及回火往复两次或多次的热循环处理时, 冷处理之间的回火, 可采用在 110 ~ 120℃ 盐浴中保温 3h 的工艺, 但最后一次冷处理后仍需在 120 ~ 130℃ 盐浴中稳定化处理 36 ~ 48h</p> <p>4. 自然稳定化处理半年是在留有极少加工余量条件下进行</p>
渗氮 量块	<p>简图同淬火量块</p> <p>材料: 3Cr13, 4Cr13</p> <p>硬度要求: ≥ 900HV</p> <p>渗氮层深度: 小于 10mm 量块要求 0.15 ~ 0.18mm, 20 ~ 100mm 量块, 要求 0.22 ~ 0.24mm</p>	喷砂→气体渗氮→精磨→去应力退火→研磨→自然稳定化处理→研磨至成品	<p>渗氮: 温度为 540 ~ 550℃, 氮分解率 25% ~ 30%, 10mm 以下量块的渗氮时间为 24h, 20 ~ 100mm 量块的渗氮时间为 48h</p> <p>去应力退火: 450℃ × 3h</p> <p>自然稳定化处理: 同淬火量块</p>	<p>1. 喷砂是不锈钢渗氮前的表面活化工序, 不可省略</p> <p>2. 小量块渗氮时, 须采取措施防止弯曲畸变</p>

表 16-40 螺纹环规和螺纹塞规热处理工艺举例

零件名称	零件简图及技术要求	热处理工艺流程	热 处 理 工 艺	备 注
螺纹环规	 <p>材料: GCr15 硬度要求: 调质后为 170 ~ 229HBW 成品为 ≥ 58HRC 显微组织要求: 调质后要求 0 ~ 3 级 成品要求马氏体级别 ≤ 2 级</p>	调质→机加工→淬火→清洗→回火→清洗→喷砂→防锈处理	<p>调质: 淬火时将工件用铁丝绑扎成串在盐浴中预热到 650 ~ 700℃, 保持 7min, 再加热到 855 ~ 860℃, 保温 7min, 或在电炉中加热 40 ~ 60min 后油淬, 然后在电炉中进行 700 ~ 720℃ × 10h 的高温回火</p> <p>淬火(盐浴): 650 ~ 700℃ 预热 8min, 再加热到 850 ~ 860℃, 保温 8min 后油淬</p> <p>回火(盐浴): 160 ~ 180℃ × 8h</p>	

(续)

零件名称	零件简图及技术要求	热处理工艺流程	热 处 理 工 艺	备 注
螺纹塞规	 <p>材料: GCr15 硬度要求: $\geq 58\text{HRC}$ 淬火马氏体级别 ≤ 2 级</p>	淬火→清洗→回火→清洗→发蓝	淬火(盐浴): $650 \sim 700^\circ\text{C}$ 预热 8min, 再加热到 $850 \sim 860^\circ\text{C}$, 保温 8~9min 后油淬 回火(盐浴): $160 \sim 180^\circ\text{C} \times 8\text{h}$	

16.4 模具的热处理

1. 冷作模具钢的热处理工艺和性能

(1) 冷作模具钢的选用(表 16-41)

表 16-41 常用冷作模具钢的选用参考

模具类别	模具名称	加工对象	钢 号	要求硬度 HRC
冲裁模	轻载冲裁模(厚度 $< 2\text{mm}$)	$< 0.3\text{mm}$ 的软料箔带	T8A, T10A	56~60(凸模) 37~40(凹模)
		硬料箔带	CrWMn	62~64(凹模) 48~52(凸模)
		小批量简单形状零件	T10A, Cr2	58~62
		中、小批量复杂形状零件	9Mn2V, CrWMn	
		高精度要求零件	Cr2, CrWMn, 9CrWMn	56~58(易折断件)
		大批量生产零件	Cr12MoV, Cr4W2MoV	
		硅钢片 小型(轻载)	CrWMn, Cr12, Cr4W2MoV	60~62(凸模) 60~64(凹模)
		中型(复杂形状)	Cr12MoV, Cr4W2MoV	
		各种易损小冲头	W18Cr4V, W6Mo5Cr4V2	59~61
	穿孔冲头	薄板、中板	T8A, T10A, 60Si2Mn	54~58
		厚板	5CrW2Si, 6CrW2Si	52~56
		奥氏体钢薄板	Cr12MoV, W6Mo5Cr4V2	58~60
		高强度钢板	6Cr4W3Mo2VNb, 6W6Mo5Cr4V	58~60 58~60
	精冲模		Cr12, Cr12MoV Cr4W2MoV, W6Mo5Cr4V2	61~63(凹模) 60~62(凸模)
	重载冲裁模	中厚钢板及高强度薄板(易损的小尺寸凸模)	Cr12MoV, Cr4W2MoV W6Mo5Cr4V2	54~56(复杂) 56~58(简单) 58~61

(续)

模具类别	模具名称	加工对象	钢 号	要求硬度 HRC
拉深模	轻载拉深模	简单圆筒浅拉深	T10A, Cr2	60 ~ 62
		成形浅拉深	9Mn2V, CrWMn	60 ~ 62
		大批量用落料或拉深复合模 (普通材料薄板)	Cr12MoV, YG8, YG15	58 ~ 62(凸模) 62 ~ 64(凹模)
	重载拉深模	大批量小型拉深模	Cr12, Cr12MoV	60 ~ 62
		大批量大中型拉深模	球墨铸铁, Ni-Cr 合金铸铁	45 ~ 50
		耐热钢、不锈钢拉深模	Cr12MoV, Cr12Mo1V1, GT35, YG8, YG15	64 ~ 66
弯曲模	弯曲翻边模	轻型, 简单	T10A	57 ~ 60
		简单, 易裂	T7A	54 ~ 56
		轻型复杂	CrWMn, 9CrWMn	57 ~ 60
		大批生产用	Cr12MoV, Cr4W2MoV	57 ~ 60
		高强度钢板及奥氏体钢板	Cr12MoV, Cr4W2MoV	65 ~ 67(渗氮)
	大中型弯板机通用 模具	互换性要求严格, 形状复杂	5CrMnMo, 5CrNiMo	42 ~ 48
冷精压模	平面精压模	非铁金属	T10A, Cr2	59 ~ 61
		钢件	Cr12MoV	59 ~ 61
	刻印精压模	非铁金属	9Cr2	
		钢件	Cr12MoV, 7Cr7Mo3V2Si	58 ~ 60
	主体精压模	浅型腔	GCr15, 9Cr2	60 ~ 62
		复杂型腔	5CrNiMo, 7CrSiMnMoV	54 ~ 56
冷滚压模	搓螺纹板	一般	9SiCr, Cr12MoV	58 ~ 61
	滚螺纹模及滚齿纹 模	一般, 轻载	9SiCr, Cr12MoV	58 ~ 61
		螺距 > 3mm, 中载		56 ~ 58
		梯形螺纹, 齿纹, 高韧性		54 ~ 56
	成形滚压模	型材校直辊	9Cr2, Cr2	61 ~ 63
拉拔模	钢管、圆钢冷拔模	强烈磨损、咬合及张应力作用 特殊形状规格	T10, Cr2 45, 石墨钢 Cr12, Cr12MoV	(C-N 共渗) 61 ~ 63 渗碳淬火 40 ~ 45(心部) 61 ~ 63(表面)
冷挤压模	轻载冷挤压模	铝合金(比压 < 1470MPa)	Cr2, GCr15(小型) Cr12MoV(中型)	60 ~ 62 58 ~ 60

(续)

模具类别	模具名称	加工对象	钢 号	要求硬度 HRC
冷挤压模	重载冷挤压模	钢件(比压 1470 ~ 1960MPa)	凸模: 6W6Mo5Cr4V W6Mo5Cr4V2 6Cr4W3Mo2VNb 7Cr7Mo3V2Si 凹模: Cr12MoV 6Cr4W3Mo2VNb CrWMn	60 ~ 62 58 ~ 60
		钢件(比压 1960 ~ 2450MPa)	W6Mo5Cr4V2 W18Cr4V	61 ~ 63
	模具型腔冷挤压凸模	一般中、小型	9SiCr, Cr2, T10A	59 ~ 61
		大型复杂件 复杂精密件 批量压制用	5CrW2Si Cr12MoV 6Cr4W3Mo2VNb 6W6Mo5Cr4V	59 ~ 61(渗碳) 59 ~ 61 59 ~ 61
		高比压(> 2450MPa)	W6Mo5Cr4V2, W18Cr4V, Cr12	61 ~ 63
冷锻模	≥ M8 凹模、顶模、 割料模、光冲	简单型腔	T10A, 9Cr2	58 ~ 60
		复杂型腔	60Si2Mn	58 ~ 62
	≤ M8 顶模、凹模、 割料模、型腔冷压凸模	精度要求高, 淬火畸变小, 耐磨性、抗压性好	9SiCr, Cr12MoV	58 ~ 60 56 ~ 58(易断裂件)
	M12 ~ 30 大型凹模、顶模、六方套、六方凹模成形凸模、切边模	强磨损、啮合作用	9Cr2, Cr12MoV	57 ~ 59
		易断裂件	9Cr2, Cr12MoV	56 ~ 58
		高综合性能(大规格顶模)	Cr12MoV(氮碳共渗)	52 ~ 56(心部) 62 ~ 64(表面)
	内外六角凸模十字槽光冲	冲击疲劳载荷大	60Si2Mn, 9SiCr	54 ~ 60
		易断裂 小规格 大规格	6W6Mo5Cr4V, W6Mo5Cr4V2 6Cr4W3Mo2VNb	59 ~ 61 54 ~ 57
	穿孔冲头(冲针)	强烈磨损和断裂	W18Cr4V W6Mo5Cr4V2	59 ~ 61

(2) 热处理(表 16-42 ~ 表 16-51, 图 16-97, 图 16-98)

表 16-42 几种冷作模具钢的正火规范

钢 号	$A_{c_{cm}}$ /℃	正火温度 /℃	硬 度 HBW	钢 号	$A_{c_{cm}}$ /℃	正火温度 /℃	硬 度 HBW
T7A	770 (A_{c_3})	800 ~ 820	229 ~ 285	9SiCr	870	900 ~ 920	321 ~ 415
T8A	740		241 ~ 302	CrWMn	940	970 ~ 990	388 ~ 514
T10A	800	830 ~ 850	255 ~ 321	9Mn2V	860	860 ~ 880	—
T12A	820	850 ~ 870	269 ~ 341	5CrMnMo	760	870 ~ 890	≤ 227
Cr2	900	900 ~ 920	302 ~ 388	5CrNiMo	770		
9CrWMn		880 ~ 900					

表 16-43 去应力退火工艺规范

碳素工具钢及合金工具钢	加热至 630 ~ 650℃, 保温 1 ~ 2h
高合金工具钢	加热至 680 ~ 700℃, 保温 2 ~ 3h

表 16-44 冷作模具钢毛坯成批等温球化退火规范

钢 号	退火硬度 HBW	显 微 组 织	加热温度/℃ × 保温时间/h	等温温度/℃ × 保持时间/h
T7A, T8A	163 ~ 187	珠光体 1 ~ 5 级	750 ~ 770 × 1 ~ 2	680 ~ 700 × 2 ~ 3
T10A, T12A	179 ~ 207	珠光体 2 ~ 4 级, 碳化物网 ≤ 2 级		
9Mn2V	≤ 229	珠光体 2 ~ 5 级, 碳化物网 ≤ 2 级	750 ~ 770 × 3	680 ~ 700 × 4 ~ 5
Cr2	≤ 229	珠光体 2 ~ 5 级 碳化物网 ≤ 2 级	790 ~ 810 × 2 ~ 3	700 ~ 720 × 3 ~ 4
9Cr2	≤ 217			
9SiCr	≤ 229			
CrWMn	≤ 241		790 ~ 810 × 2 ~ 3	700 ~ 720 × 3 ~ 4
9CrWMn	≤ 229		780 ~ 800 × 2 ~ 3	670 ~ 720 × 2 ~ 3
8Cr3	≤ 241		790 ~ 810 × 2 ~ 3	700 ~ 720 × 3 ~ 4

表 16-45 冷处理工艺规范

冷处理温度/℃	冷处理时间/min
-40 ~ -80	30 ~ 120

表 16-46 冷作模具常用的淬火工艺

模具类别	钢 号	淬火温度/℃	冷却方法	要求回火后硬度 HRC
小型模具 大中型模具 微畸变淬火	T7A ~ T12A	760 ~ 780 800 ~ 850 810 ~ 830	盐水 → 热油 盐水 → 热油 碱浴 (160 ~ 180℃)	> 58
厚度 < 20mm 模具 厚度 20 ~ 60mm 模具 微畸变淬火	Cr2, 9Cr2, GCr15	840 ~ 880	热油、冷油 碱浴 三元硝酸盐	> 58
大中型重载模具	Cr2, 9Cr2, GCr15	810 ~ 850	水喷淬或碱水淬	
厚度 < 15 ~ 20mm 模具 大中型重载模具	60Si2MnA	860 ~ 880	热油 碱浴或碱水	≥ 58
小型模具 中型模具	9Mn2V	760 ~ 780 790 ~ 810	冷油或热油 碱浴	
中型模具	9CrWMn	820 ~ 840	碱浴、油、三元硝酸盐	62 ~ 64
简单模具 复杂模具	Cr12	960 ~ 1000 1080 ~ 1100	160 ~ 180℃ 热油 250℃ 硝酸盐	62 ~ 64 40 ~ 50
重载模具	Cr12MoV	1020 ~ 1040	硝酸盐、油	60 ~ 62
微畸变淬火		980 ~ 1020 1100 ~ 1020	硝酸盐、铝板、水溶性有 机溶液 ^①	58 ~ 62 40 ~ 50

(续)

模具类别	钢 号	淬火温度/℃	冷却方法	要求回火后硬度 HRC
高韧性模具	W6Mo5Cr4V2	1140 ~ 1160	2-3-5 盐浴 ^②	59 ~ 62
高抗压、高强度模具		1150 ~ 1200	2-3-5 盐浴 ^②	
		1180 ~ 1200	油、2-3-5 盐浴 ^②	
高韧性模具	W18Cr4V	1150 ~ 1200	2-3-5 盐浴或水溶性 有机溶液 ^①	59 ~ 62
高抗压、高强度模具		1230 ~ 1250		
高韧性模具	6W6Mo5Cr4V	1180 ~ 1200	2-3-5 硝盐等温	
高耐磨模具 高强韧模具	Cr4W2MoV	900 ~ 920	硝盐、油	58 ~ 62
		960 ~ 980	空气、油	
		1020 ~ 1050	硝盐、油、蒸汽	
高强韧模具	7Cr7Mo3V2Si	1100	油	≥ 60
高强韧模具	6Cr4W3Mo2VNb	1080 ~ 1120	油(20 ~ 80℃)	≥ 61
		1120 ~ 1160		
		1180 ~ 1190		
简单模具	9SiCr	860 ~ 880	冷油、热油	≥ 58
复杂模具			热油、硝盐等温	
一般模具	5CrMnMo	840 ~ 860	热油	48 ~ 53
高强韧模具			硝盐等温	
重载冷压冲头	5CrNiMo	840 ~ 860 880 ~ 900	油	58 ~ 60
精压模				56 ~ 58
高韧性的大、中型重载模具				48 ~ 53

① 50% 聚乙烯醇水溶液。

② $w_{\text{NaCl}} 20\% + w_{\text{CaCl}_2 (\text{KCl})} 30\% + w_{\text{BaCl}_2} 50\%$ 。

表 16-47 冷作模具的常规加热系数

钢 种	加 热 温 度 /℃	加热系数 $K/\text{min} \cdot \text{mm}^{-1}$	
		盐 浴 炉	电 炉
碳素工具钢	550 ~ 620	1	—
	760 ~ 840	0.4 ~ 0.5	1 ~ 1.5
低合金模具钢	550 ~ 620	1	—
	820 ~ 950	0.5 ~ 0.6	1 ~ 1.5
中、高合金模具钢	550 ~ 620	1	—
	800 ~ 850	0.5	1 ~ 1.5
	950 ~ 1100	0.3 ~ 0.4	0.6 ~ 0.8
	950 ~ 1100(不预热)	—	1 ~ 1.3

表 16-48 模具在各种冷却介质中的冷却时间

冷却介质	冷却时间
盐水→油	盐水中: 1s/(3 ~ 5mm)
冷油→热油	冷油中: 1s/(3 ~ 5mm)
热油	冷到 200 ~ 300℃ 取出
硝盐	1min/(5 ~ 10mm)
碱浴	1min/(10mm)(一般约为淬火加热时间的 1/3 ~ 1/2)
2-3-5 低温盐	相当于模具在盐浴中淬火加热时间

表 16-49 常用冷作模具钢的回火温度与硬度

钢 号	淬火硬度 HRC	达到下列硬度(HRC)范围的回火温度/℃				
		45 ~ 50	52 ~ 56	54 ~ 58	58 ~ 61	60 ~ 63
T7A	62 ~ 64	330	250	220	170	150
T8A	62 ~ 64	350	270	230	190	160
T10A, T12A	62 ~ 64	370	290	250	210	70
9Mn2V	62.0	380	300	250	220	150 ~ 180
Cr2	62	450	290	300	200	150
9SiCr	65	450	350	320	250	190
5CrW2Si		420	280	250	—	—
Cr12(980℃淬火)	63	—	—	320 ~ 350	250	180 ~ 190
Cr12MoV(1030℃淬火)	63	—	540	400	230	170
5CrMnMo		380	250	200	—	—
W6Mo5Cr4V2	> 60	—	—	—	620	560
W18Cr4V	> 62	—	—	—	620	560
6W6Mo5Cr4V		—	—	—	—	560
Cr4W2MoV	60 ~ 62	—	—	—	520 ~ 540	—
7Cr7Mo3V2Si		—	—	—	—	530 ~ 540
6Cr4W3Mo2VNb		—	—	540 ~ 580	—	—
60Si2Mn		400	—	300 ~ 350	—	—

注：碳素工具钢一般采用一次回火；合金钢应采用二次或多次回火，回火时间 2 ~ 3h。

表 16-50 冷作模具钢的回火脆性温度范围

钢 号	CrWMn	9Mn2V	GCr15	9SiCr	Cr12	Cr12MoV
温度/℃	250 ~ 300	190 ~ 230	200 ~ 250	200 ~ 240	290 ~ 330	325 ~ 375

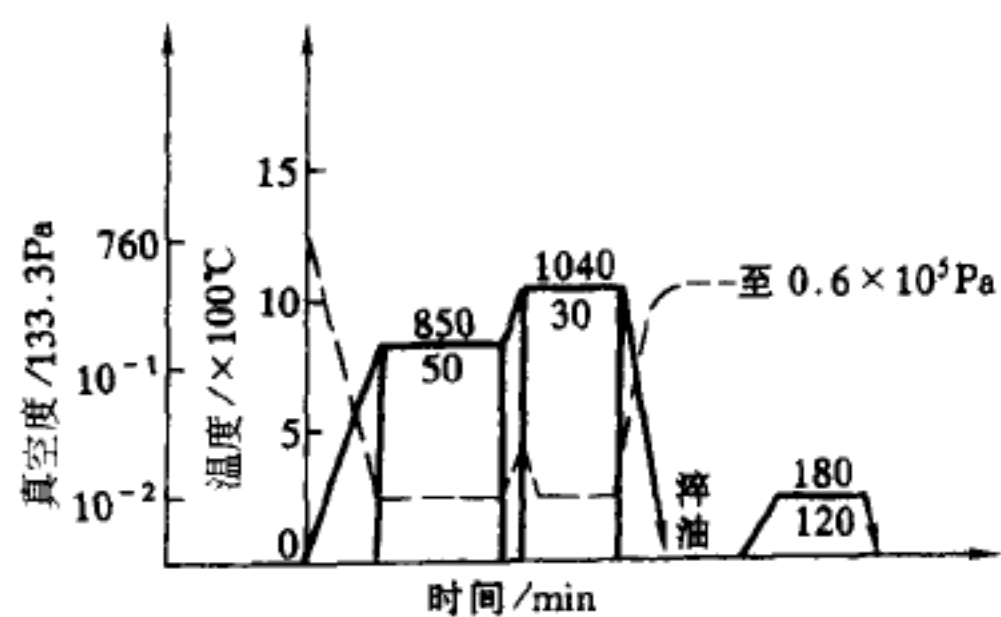


图 16-97 Cr12MoV 冷冲模
真空热处理工艺

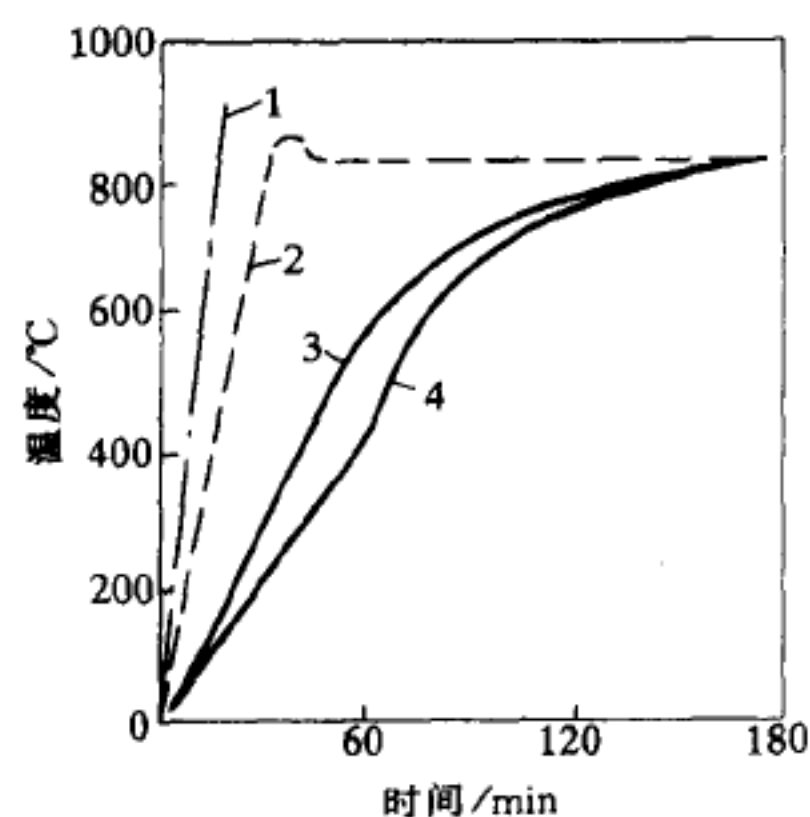


图 16-98 Cr12MoV 钢棒(φ125mm × 300mm)

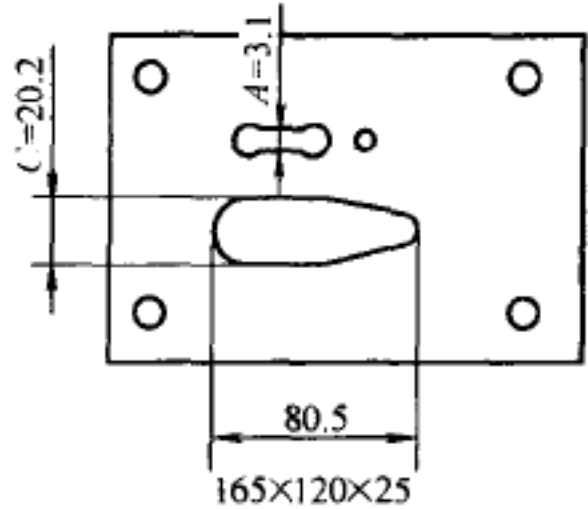
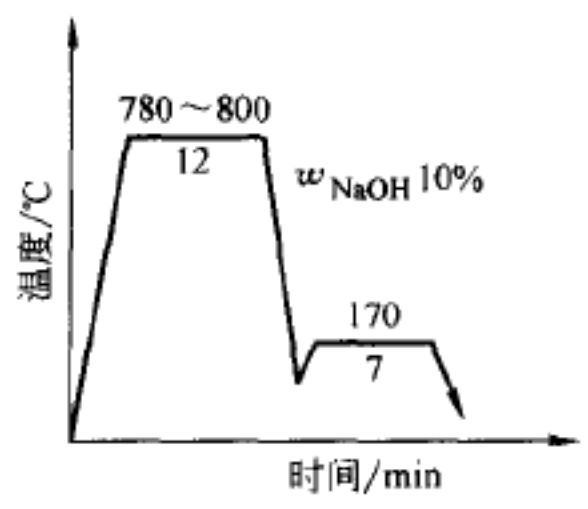
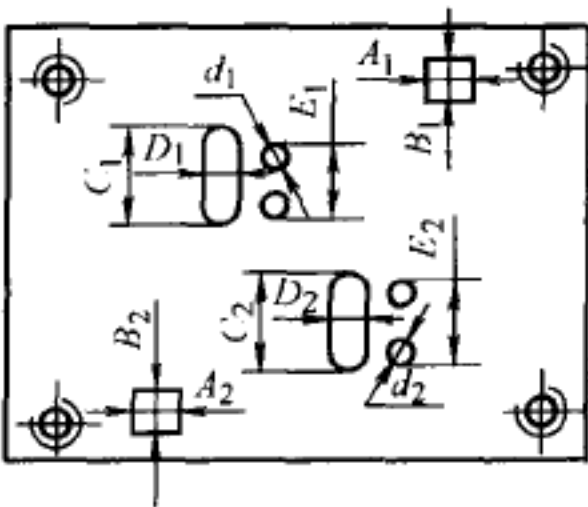
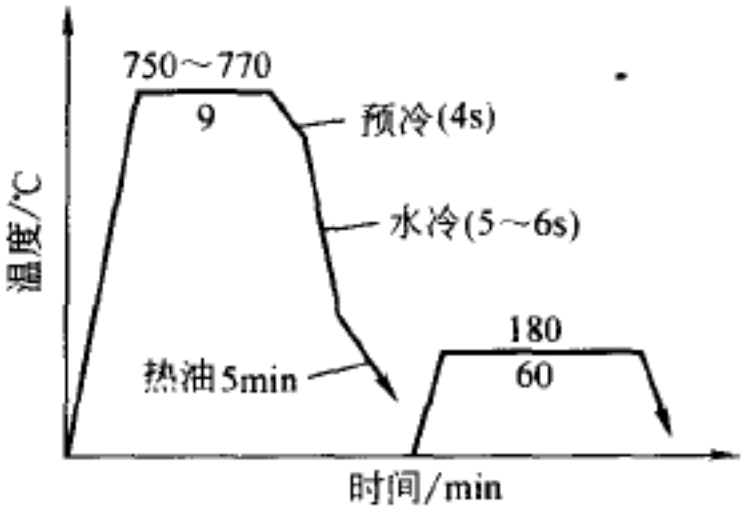
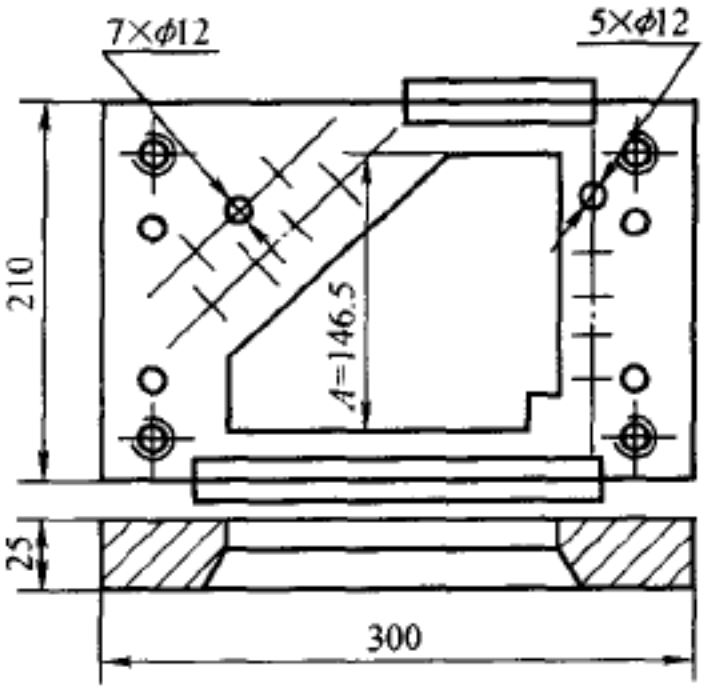
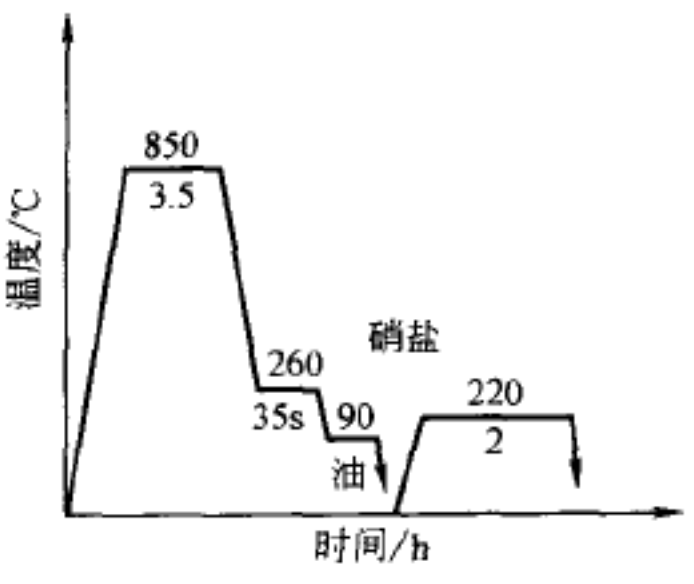
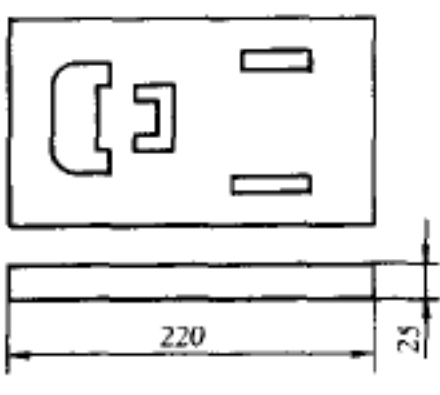
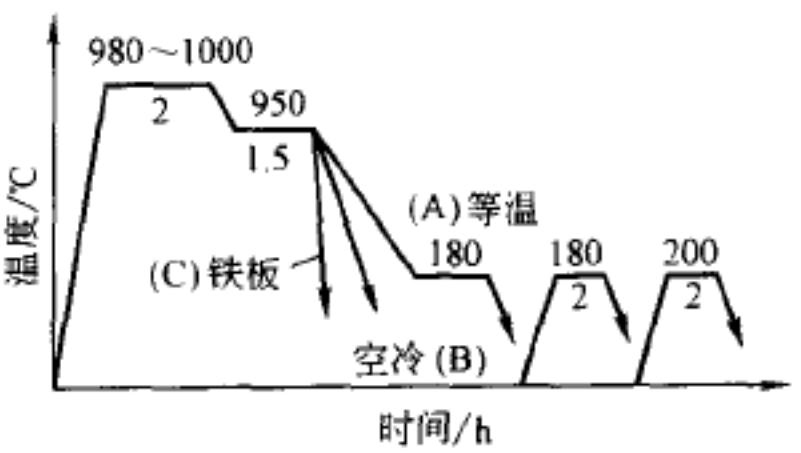
在盐浴和真空中加热的比较

1—在盐浴中的加热曲线 2—炉温

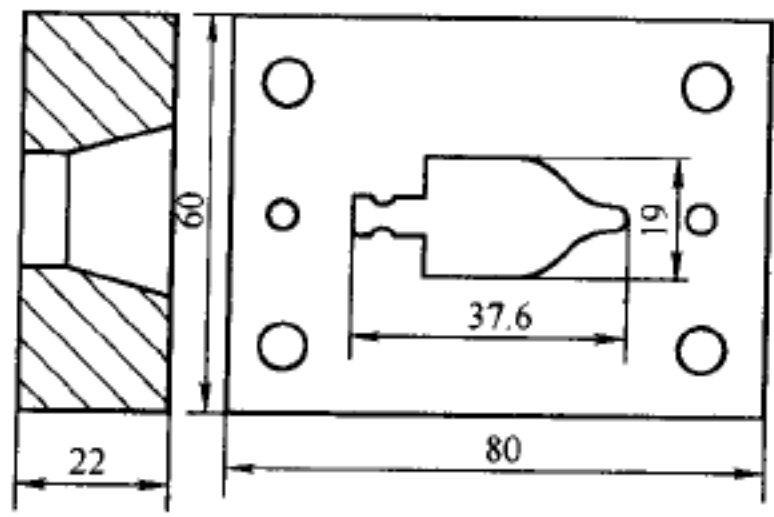
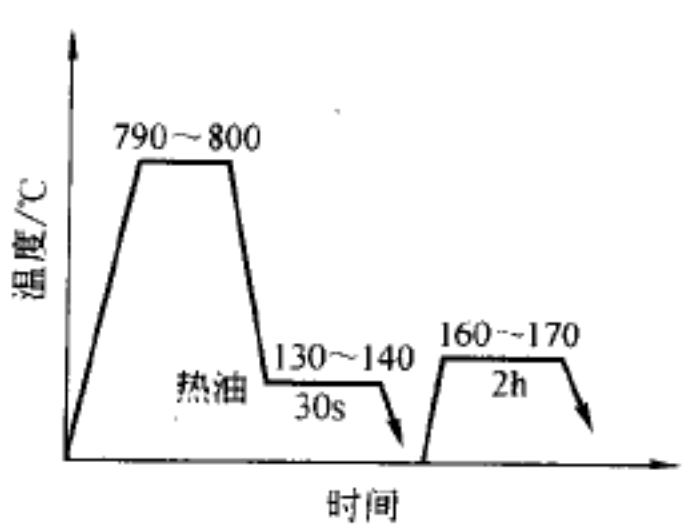
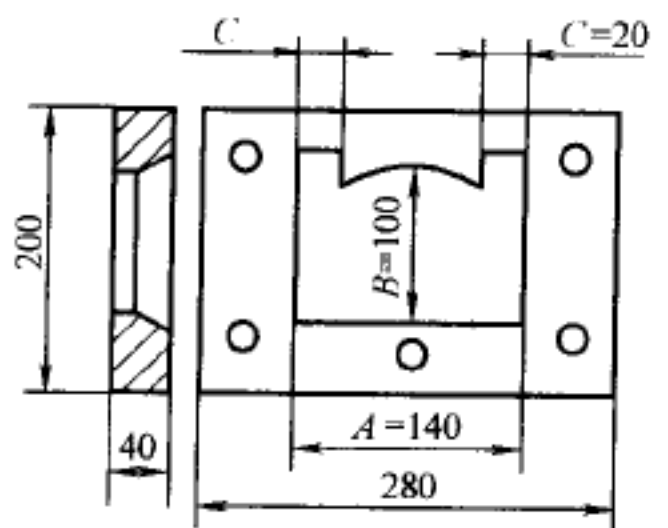
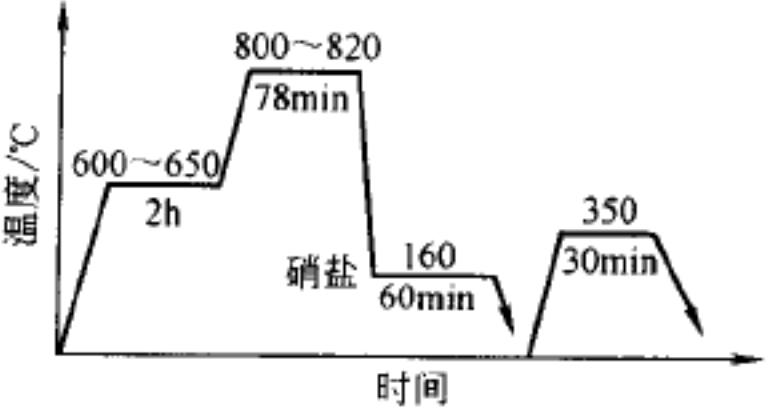
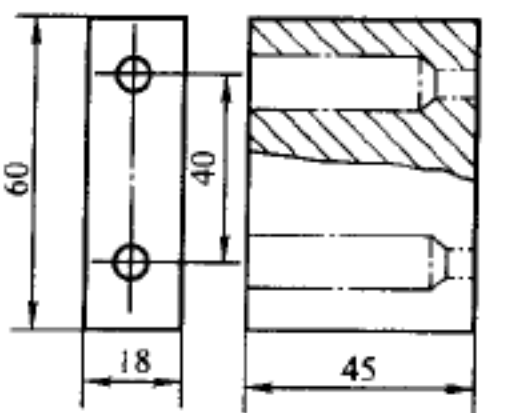
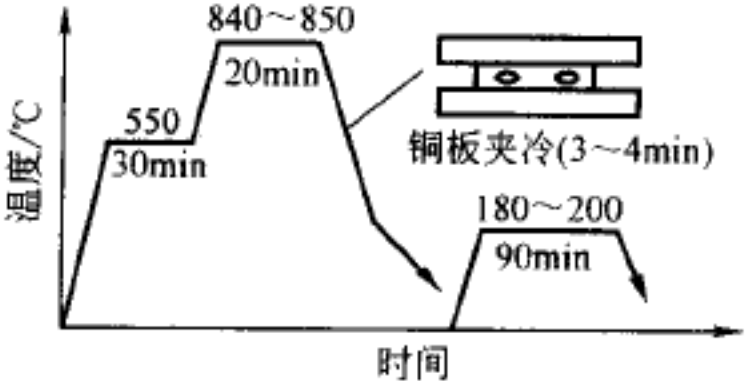
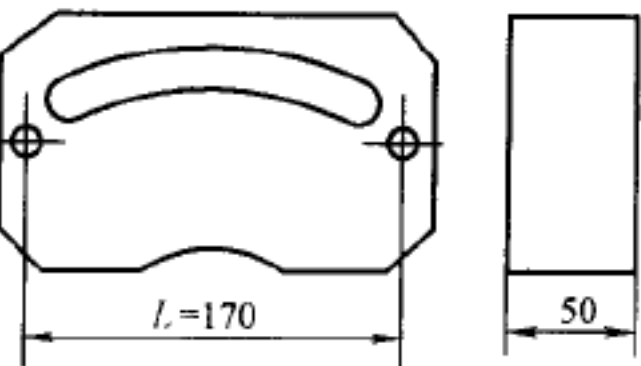
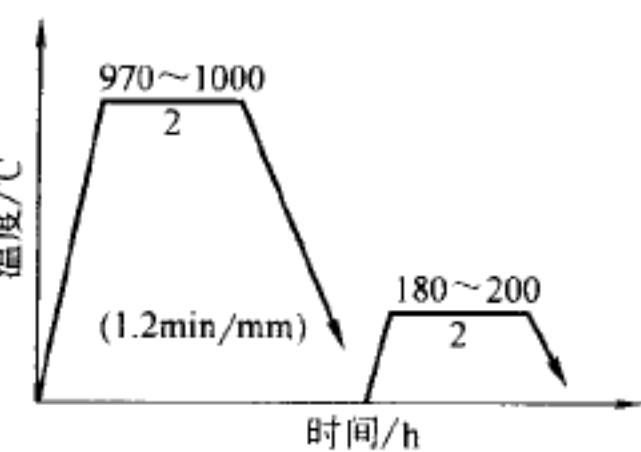
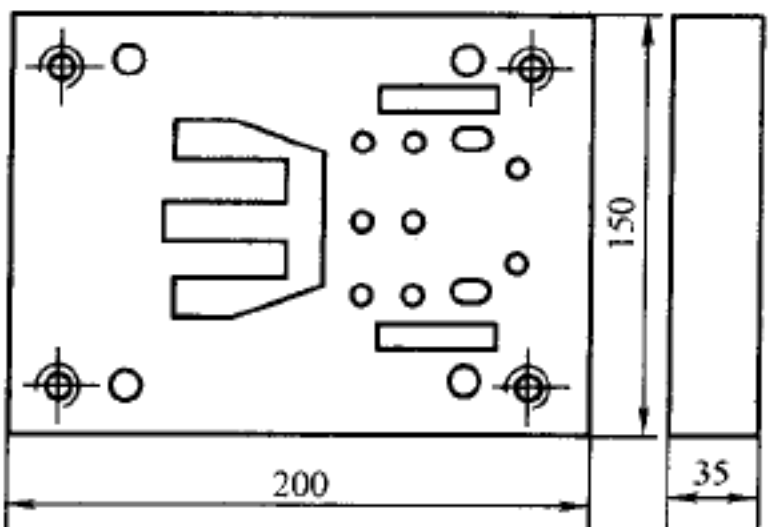
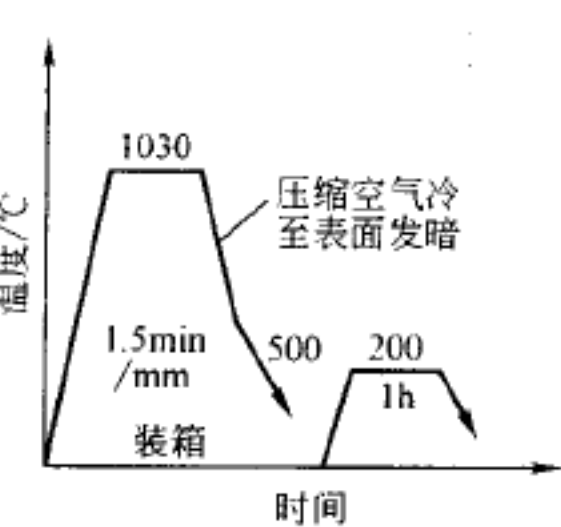
3—在真空中加热的表面温度

4—在真空中加热的心部温度

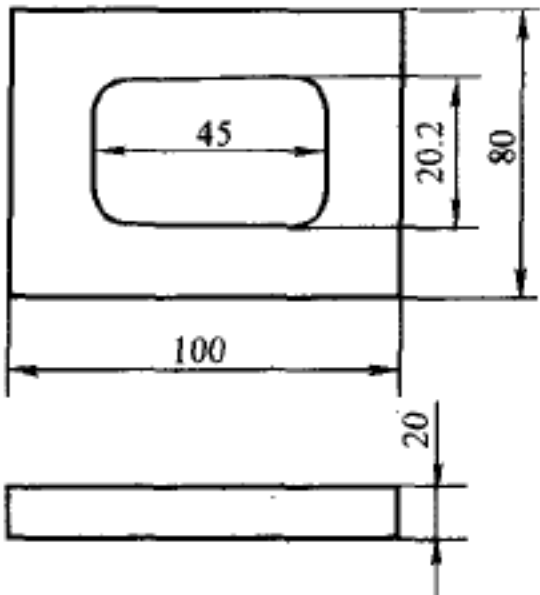
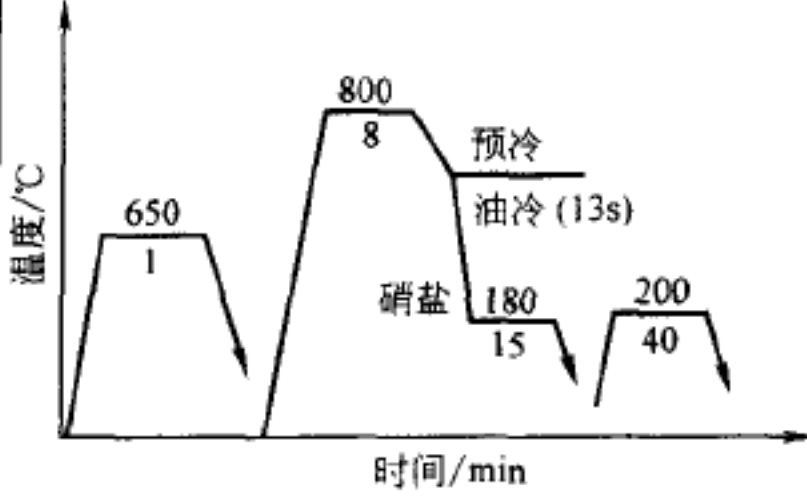
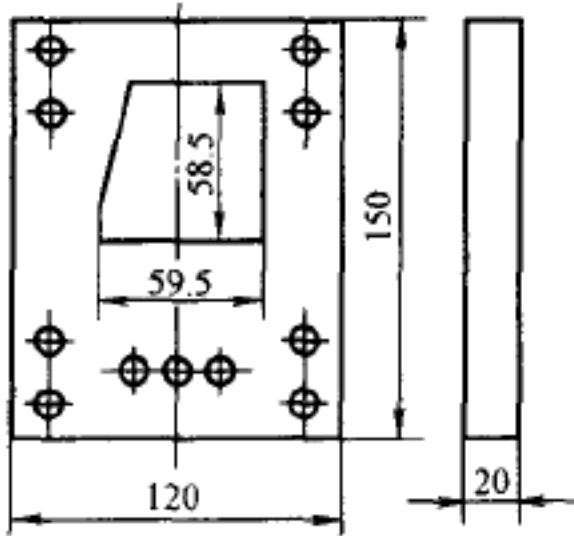
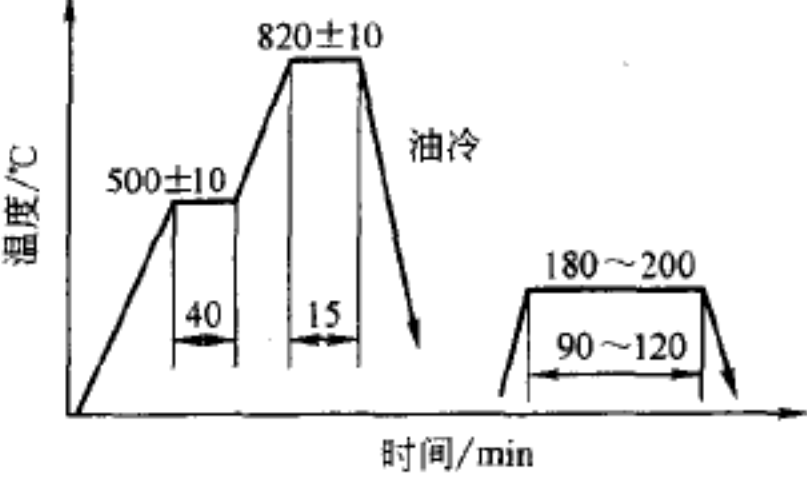
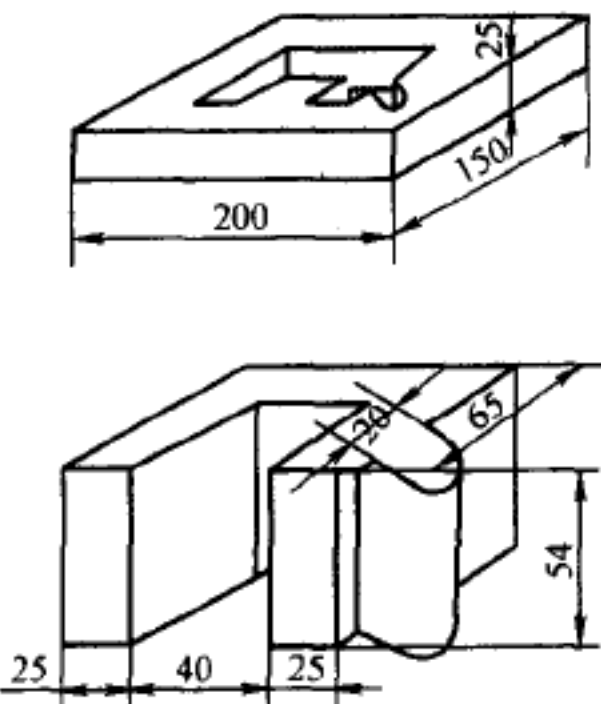
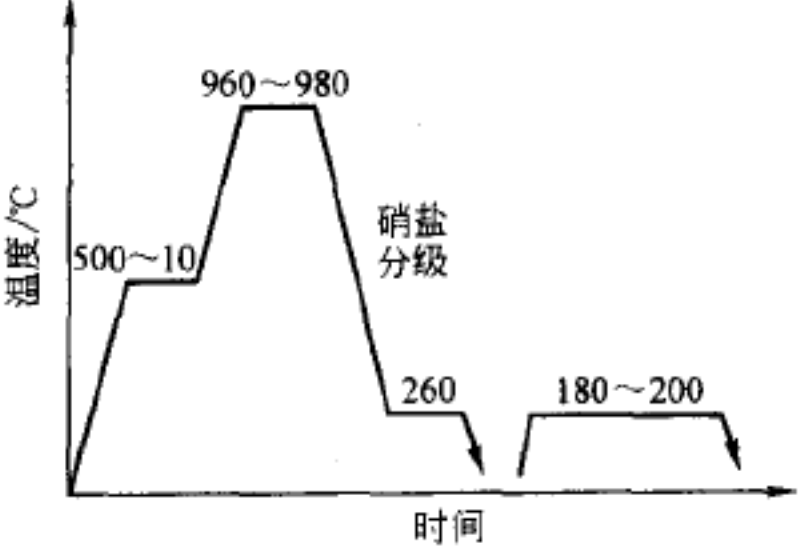
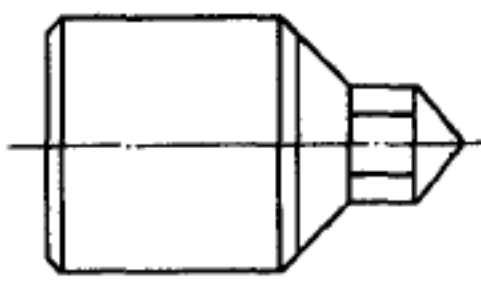
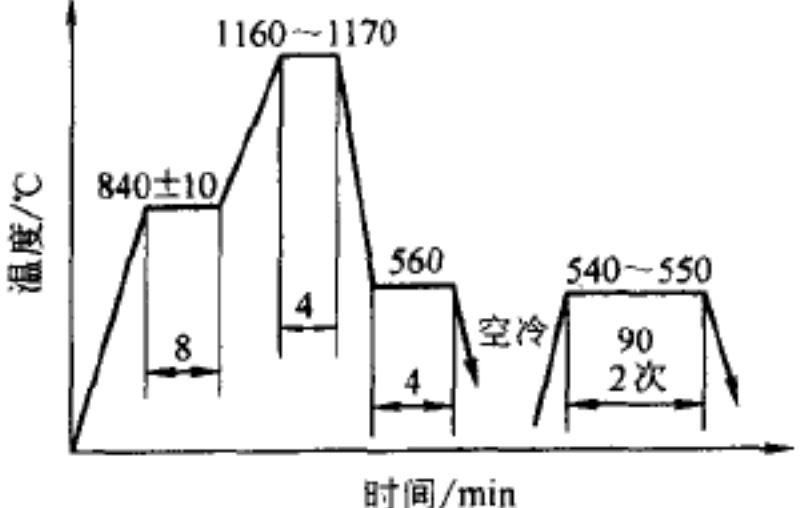
表 16-51 冷作模具热处理工艺示例

模具名称	材料	模具简图	热处理工艺	备注
凹模	T8A			碱水-硝盐复合分级淬火, 刃口 59~62HRC, 其余 50~55HRC
碳素工具钢薄板冲模(小型)	T10A			低温淬火、低温回火微变形处理
薄板冲模	CrWMn			增加工艺孔及局部包扎铁皮(加阴影处)低畸变处理。 A 缩 = 0.05 ~ 0.1mm, 60 ~ 62HRC
精密凹模	Cr6WV			铁板夹冷有最小的畸变, 畸变为 +0.02mm

(续)

模具名称	材料	模具简图	热处理工艺	备注
冲裁模	9Mn2V			热油淬, 型腔尺寸基本无变化, 总寿命高(42万), 58~62HRC
凹模	CrWMn			硝盐淬火, 型孔胀 (+0.03~0.07mm)
凸凹模	CrWMn			铜板夹冷, 孔距畸变量 $L < 0.02\text{mm}$
凸凹模	Cr12MoV			下限加热, 空冷淬火, L 畸变率 0.02%
凹模	Cr12MoV			风冷、空冷淬火, 适于截面厚 20~30mm 的 Cr12 及 50~60mm 的 Cr12MoV 钢

(续)

模具名称	材料	模具简图	热处理工艺	备注
凹模	CrWMn			冷油淬火, 型腔侧壁畸变凸出, 先硝盐及油冷淬火, 型孔胀大过多, 按左图工艺处理; 型孔均匀胀大 0.01 ~ 0.02mm
落料凹模	CrWMn			58 ~ 62HRC
落料凸模凹模	Cr12			58 ~ 62HRC
冷镦六角凸模	6Cr4W3-Mo2VNb			59 ~ 61HRC

(3) 力学性能

1) Cr12(图 16-99 ~ 图 16-103)

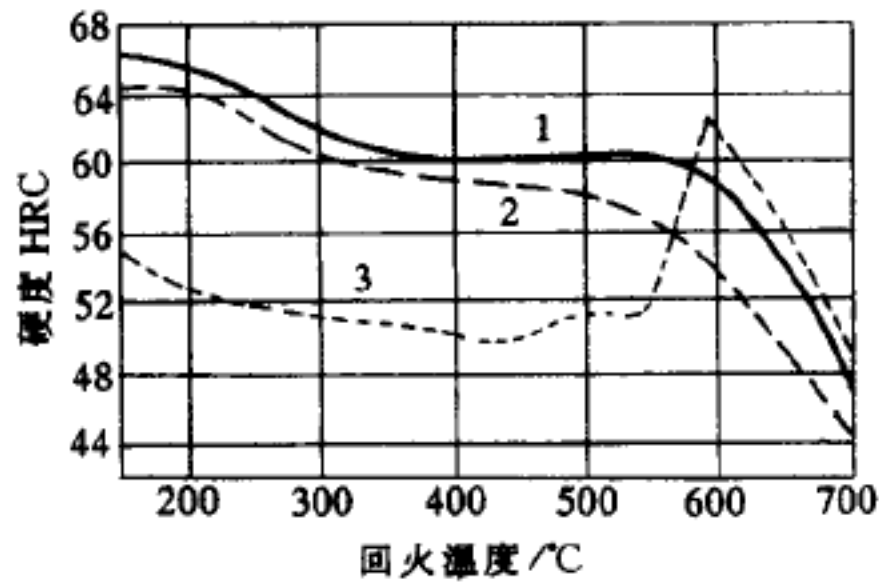


图 16-99 不同淬火温度下硬度与回火温度的关系曲线
(淬火温度:1—955℃,2—1010℃,3—1090℃)

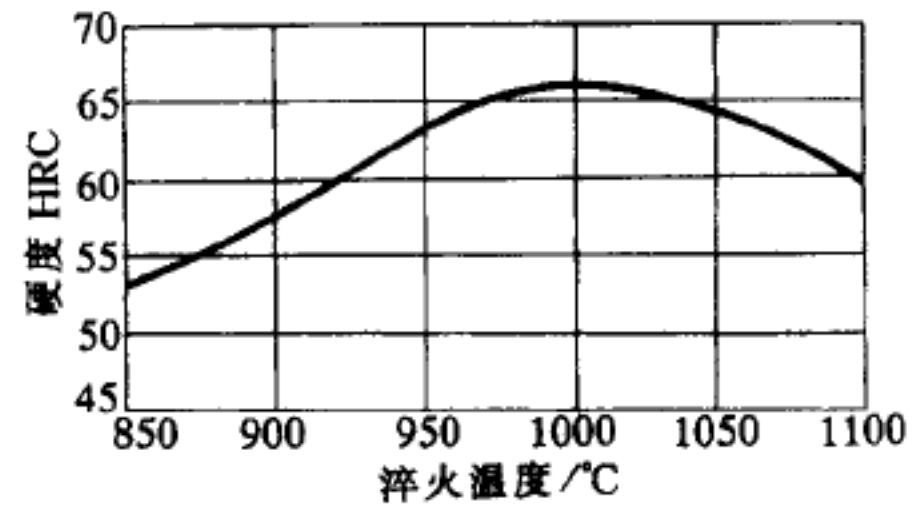


图 16-100 淬火硬度与淬火温度的关系

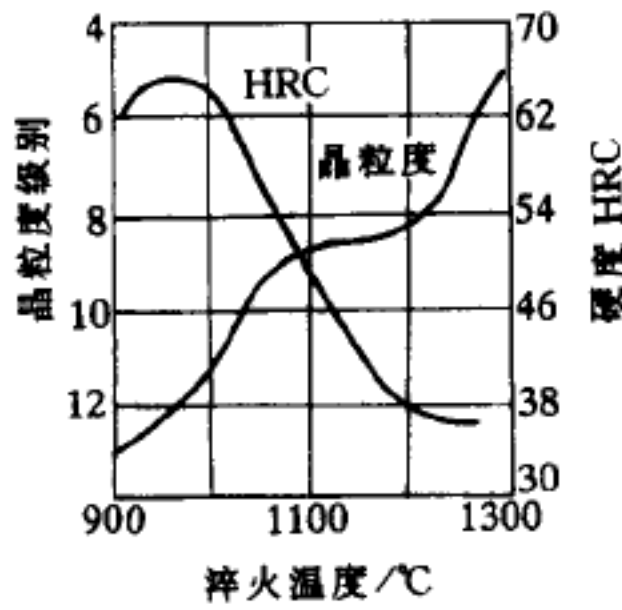


图 16-101 硬度、奥氏体晶粒度与淬火温度的关系

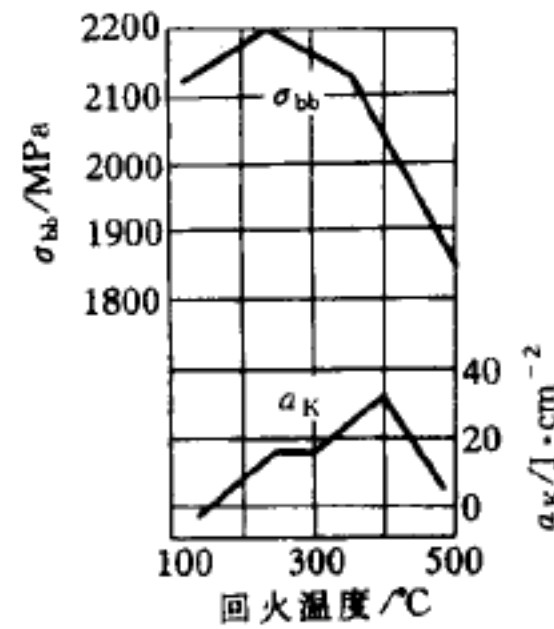


图 16-102 经 960~980℃加热淬油后并在不同温度回火保持 1.5h 的力学性能

2) Cr12MoV(图 16-104 ~ 图 16-110)

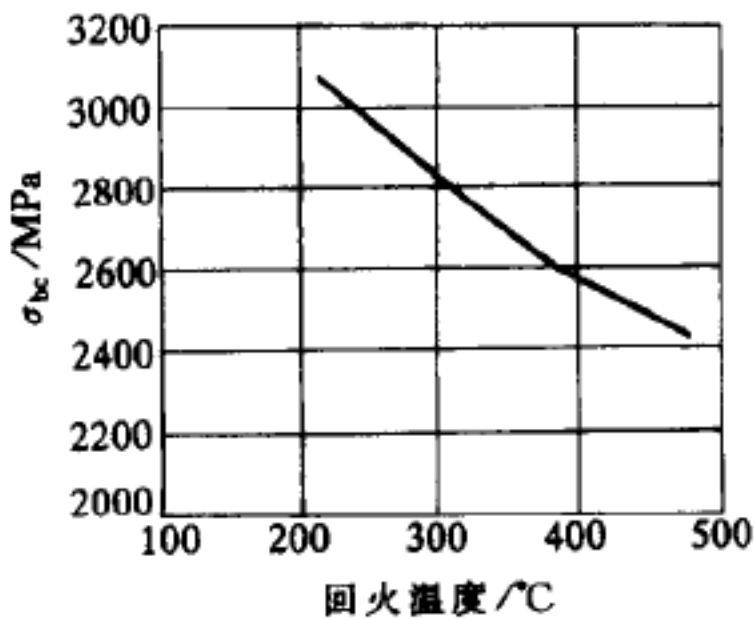


图 16-103 抗压强度与回火温度的关系

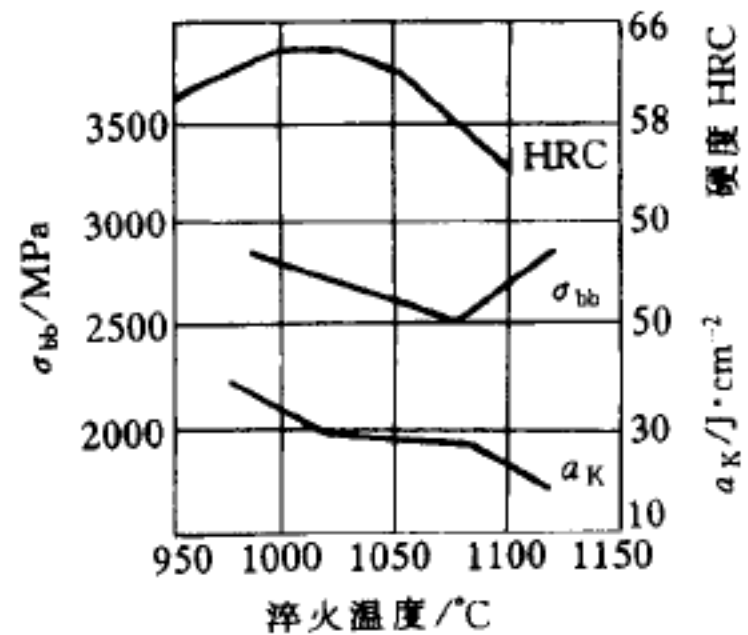


图 16-104 不同淬火温度的力学性能

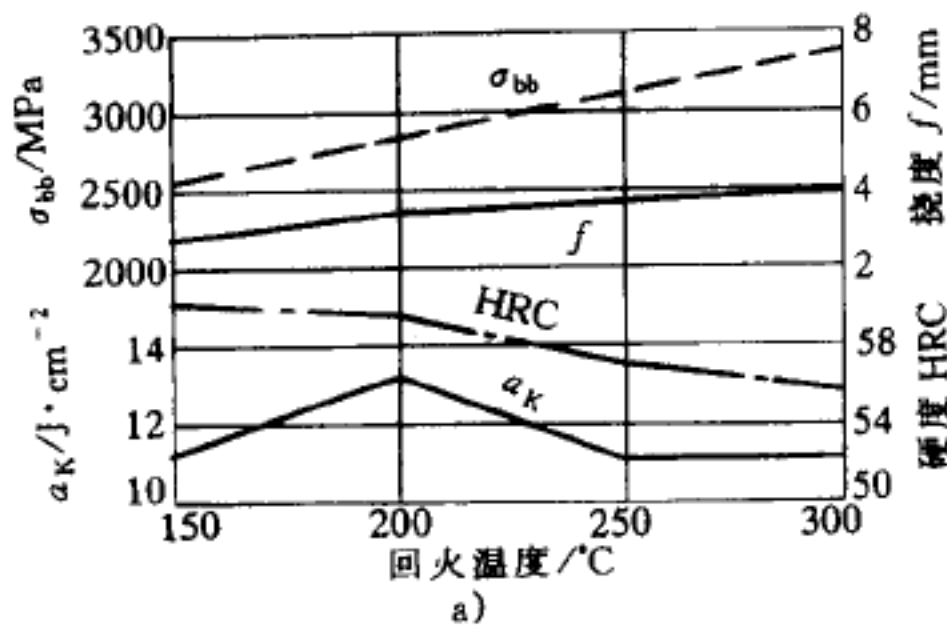
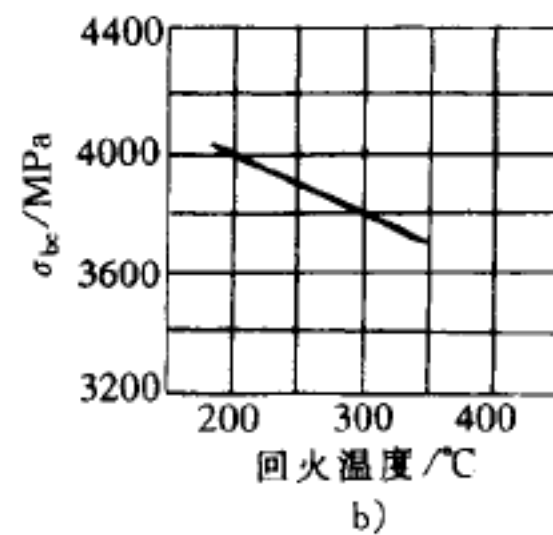


图 16-105 不同回火温度的力学性能
a) 100℃加热油淬 b) 最佳淬火温度淬火



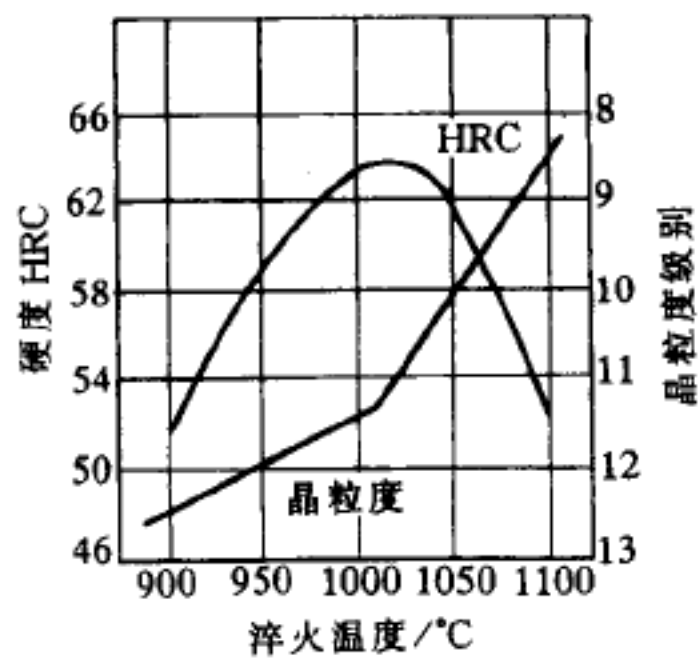


图 16-106 不同淬火温度对
淬火硬度和晶粒度的影响

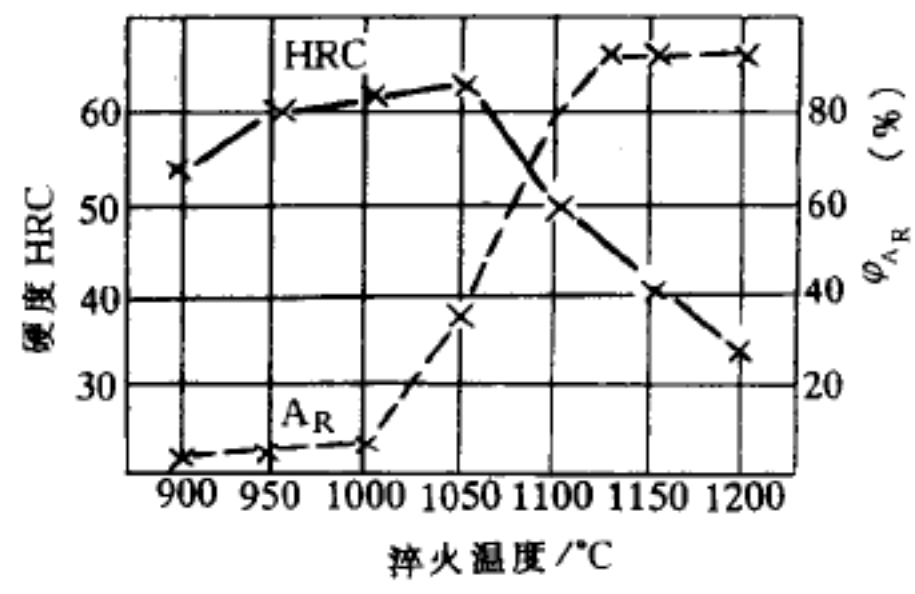


图 16-107 淬火温度对硬度和
残留奥氏体量的影响

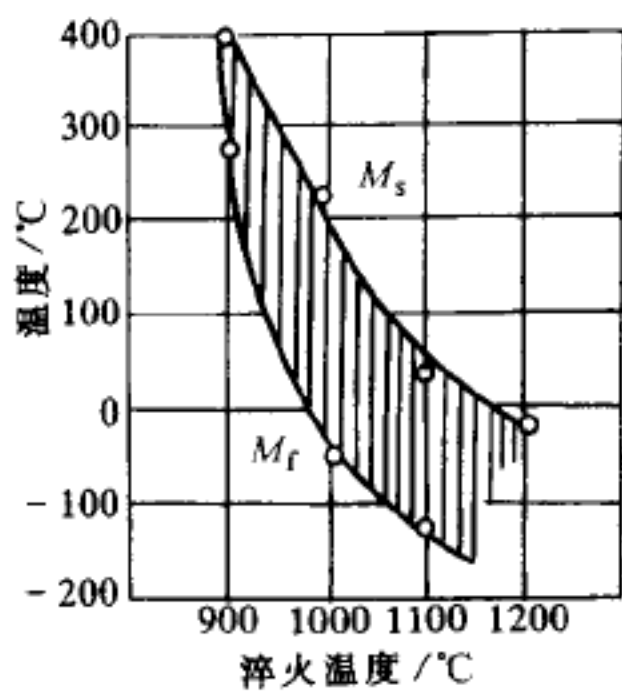


图 16-108 淬火温度对马
氏体转变温度的影响

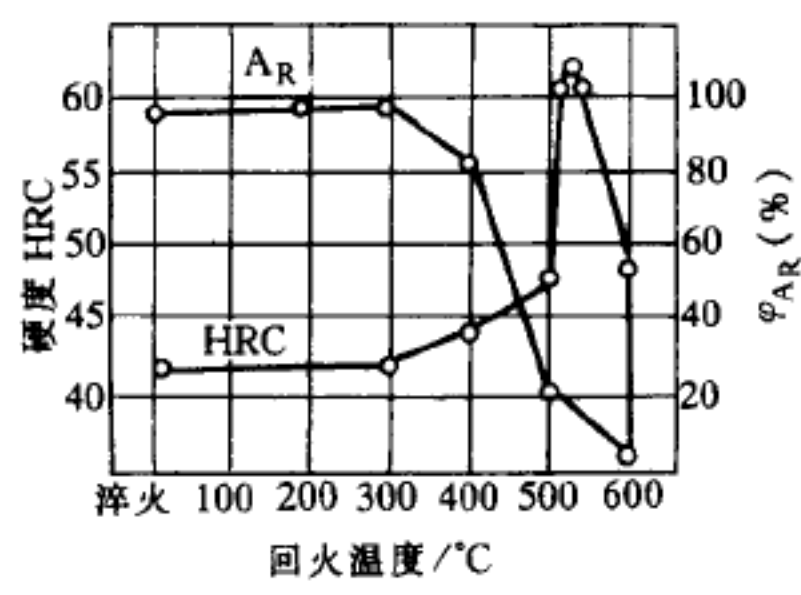


图 16-109 回火温度对硬度及
残留奥氏体量的影响
(1130°C 淬火)

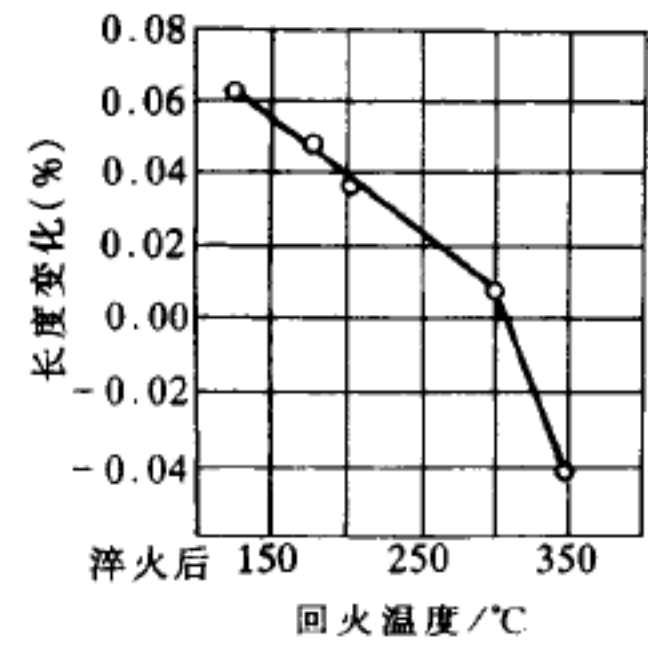


图 16-110 经 1050°C 加热淬火后试
样长度变化与回火温度的关系

3) 9Mn2V(图 16-111 ~ 图 16-114)

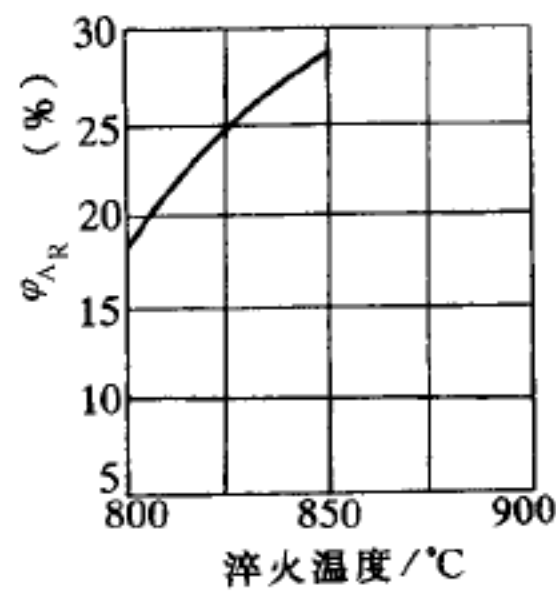


图 16-111 残留奥氏体量
与淬火温度的关系

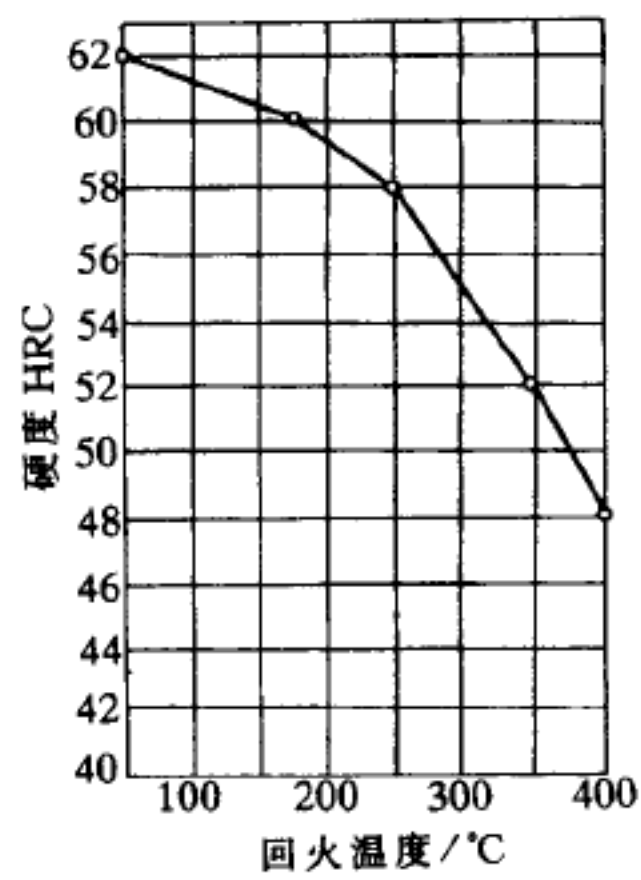


图 16-112 硬度与回火温度
的关系(790°C 油淬)

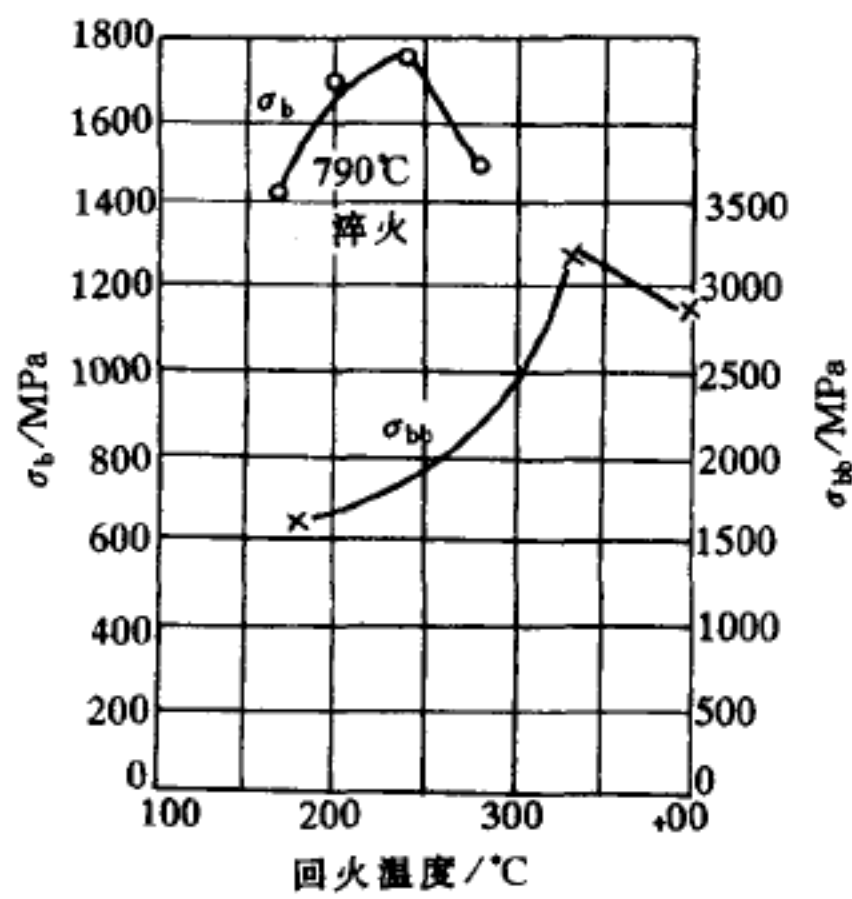


图 16-113 不同温度回火后的抗拉强度和抗弯强度(790℃油淬)

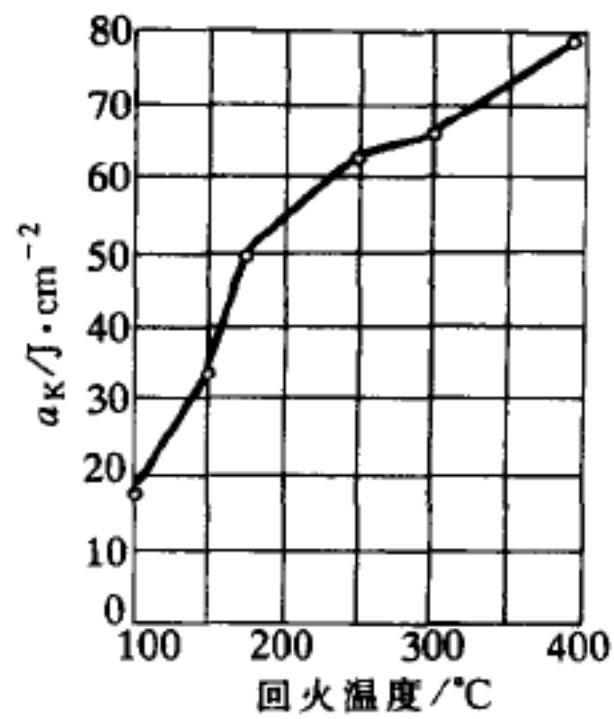


图 16-114 不同温度回火后的冲击韧度(790℃油淬)

4) CrWMn(图 16-115 ~ 图 16-118)

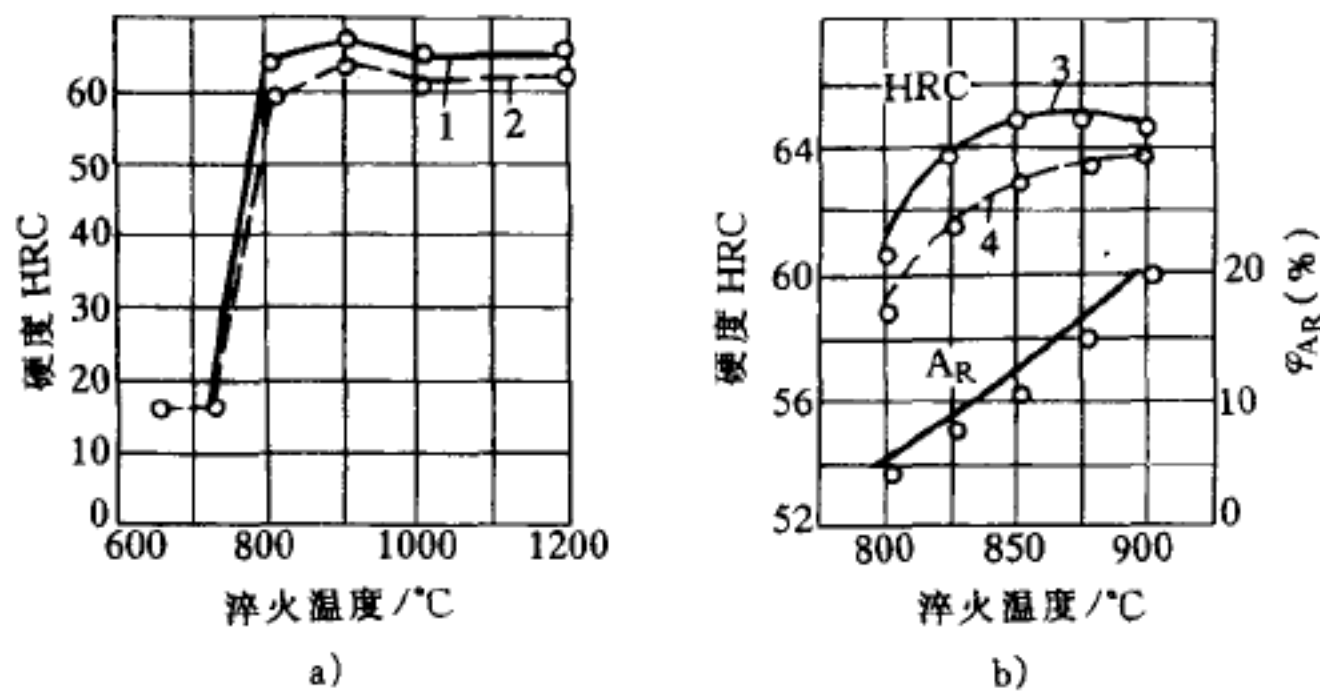


图 16-115 淬火温度对硬度和残留奥氏体量的影响
(试样直径为 20mm;1—试样表面硬度,2—试样中心硬度,3—油冷,4—硝盐冷)

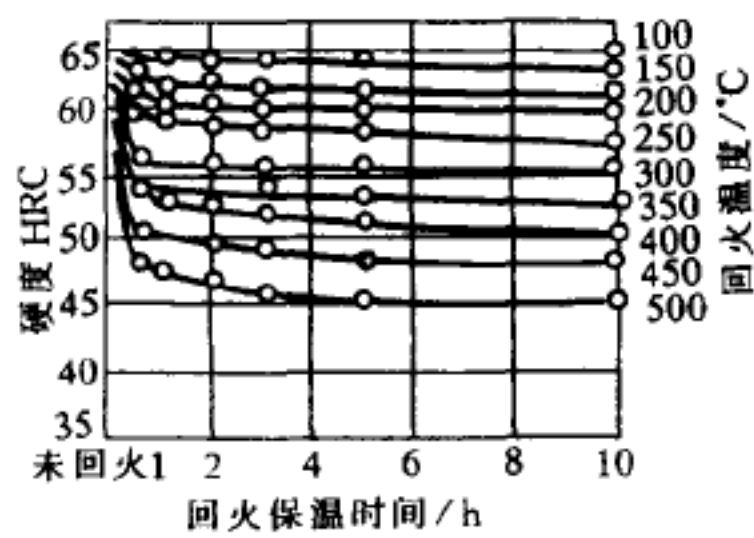


图 16-116 硬度与回火时间的关系
(830℃油淬)

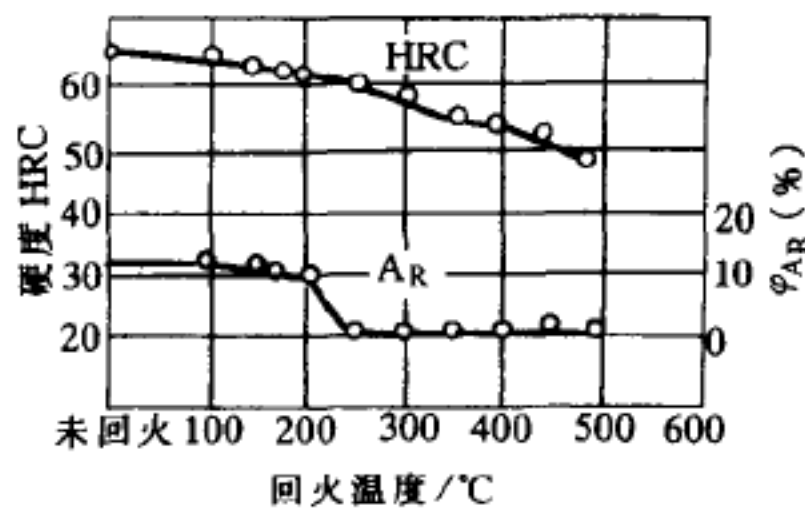


图 16-117 硬度和残留奥氏体量与回火温度的关系
(830℃油淬;回火 60min)

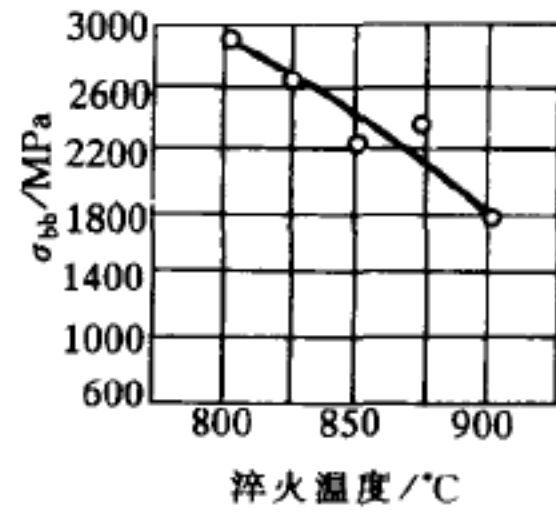


图 16-118 淬火温度对抗弯强度的影响

5) 9CrWMn(图 16-119)

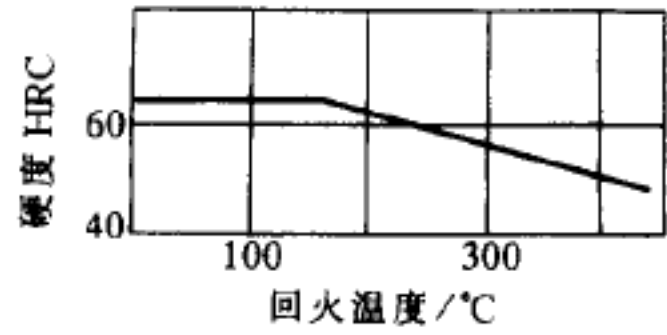


图 16-119 回火硬度曲线
(840℃油淬,回火保温 90min)

6) Cr4W2MoV(图 16-120 ~ 图 16-123)

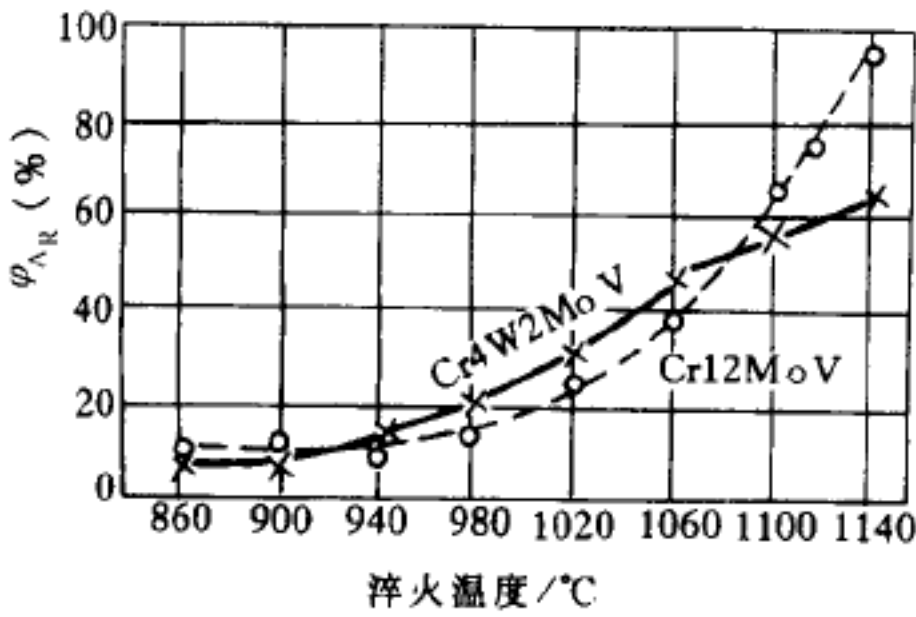


图 16-120 淬火温度对
残留奥氏体量的影响

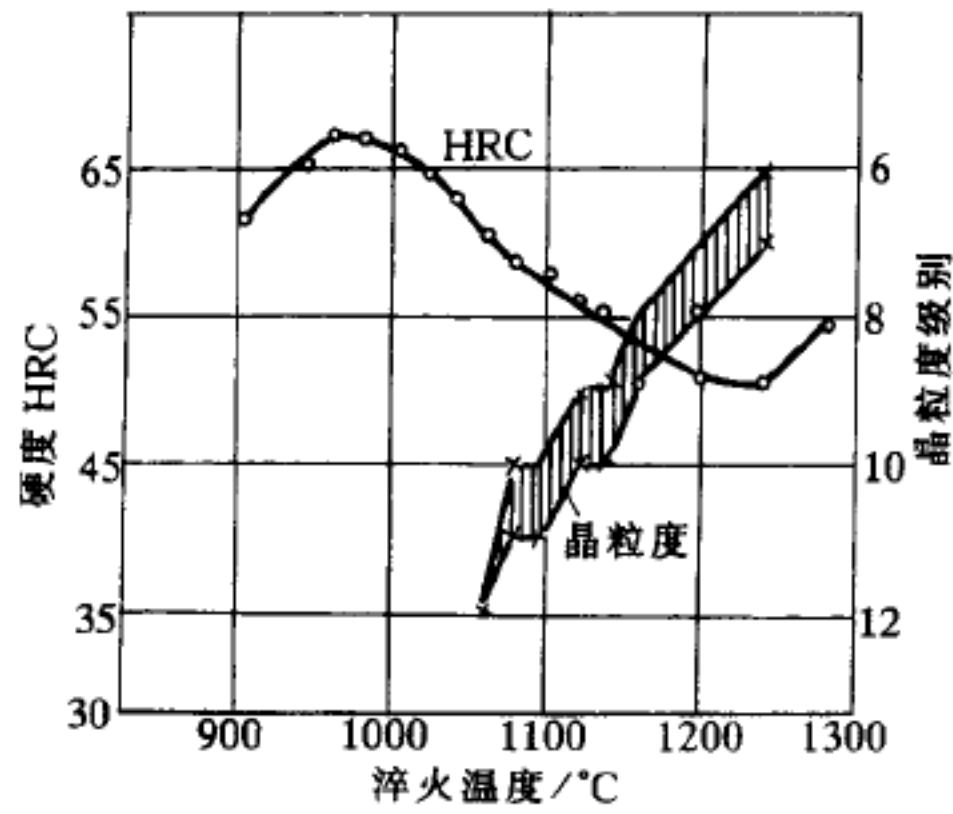
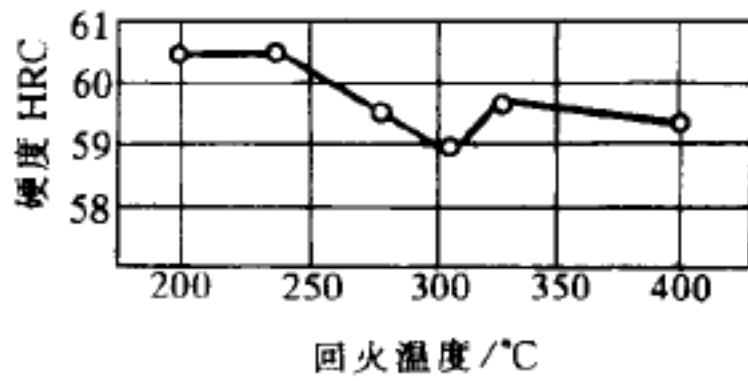
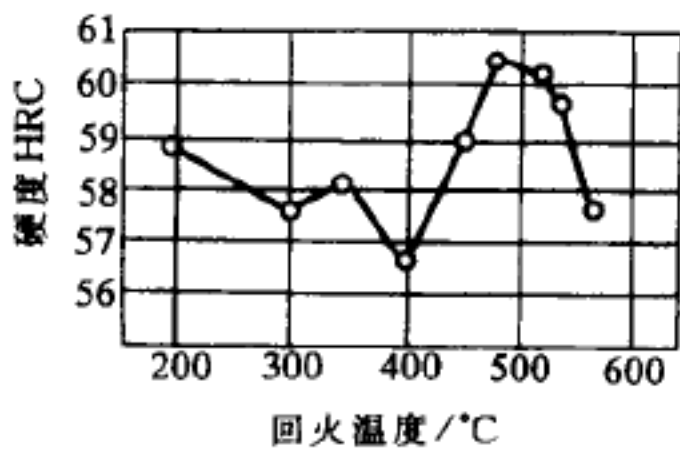


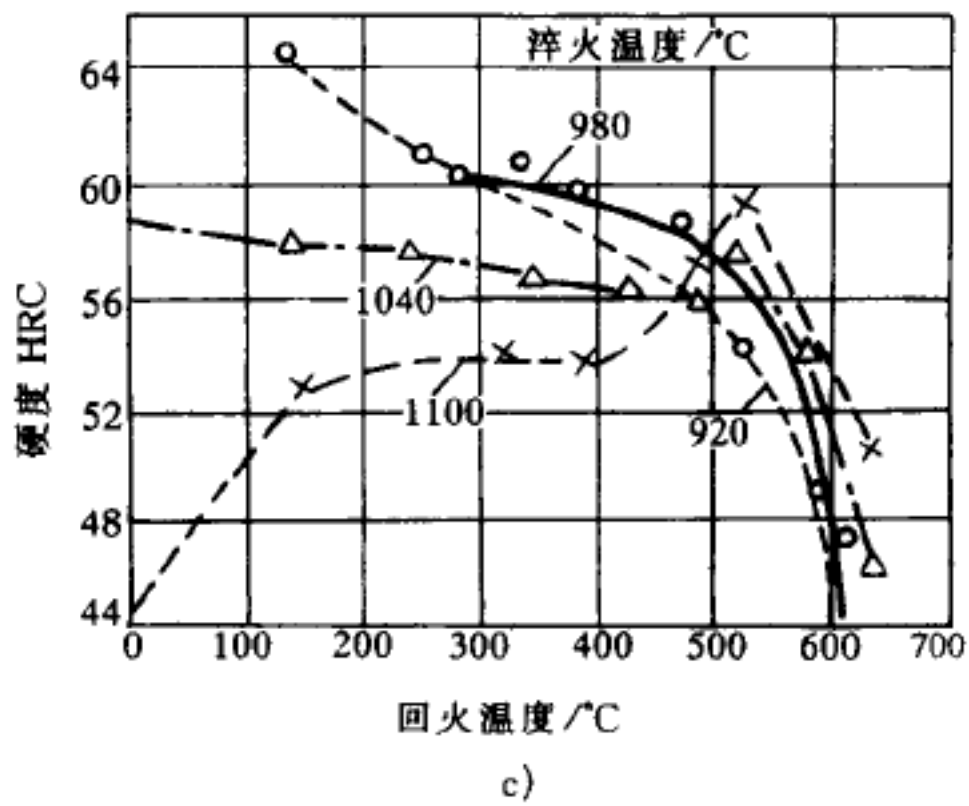
图 16-121 淬火温度对晶粒尺寸
和硬度的影响



a)
960℃加热淬油



b)
1020℃加热淬油



c)
920~1100℃加热淬油

图 16-122 回火硬度曲线

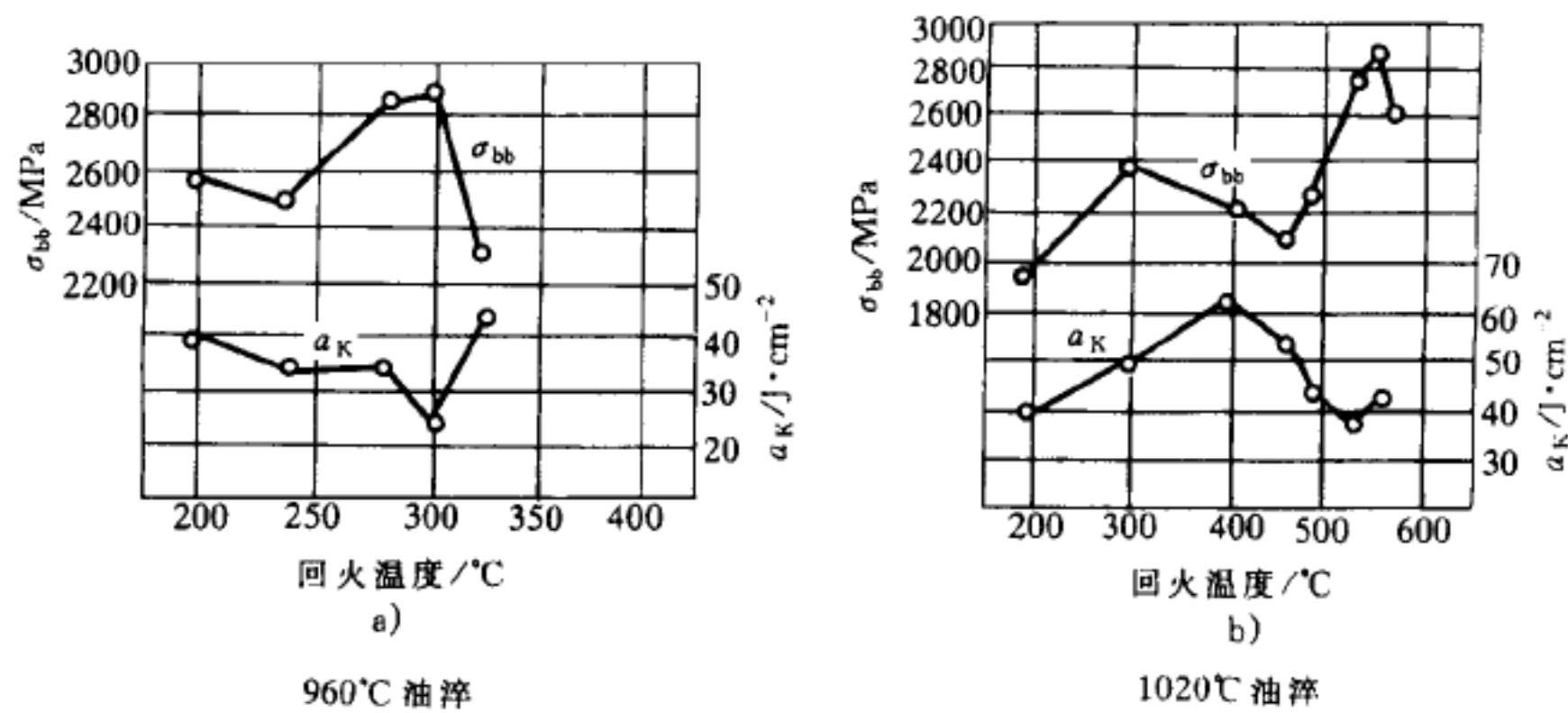


图 16-123 不同温度淬火、回火对力学性能的影响

2. 热作模具钢热处理工艺和性能

(1) 热作模具钢的选用(表 16-52,图 16-124)

表 16-52 热作模具常用钢种及要求的硬度值

模 具 类 型		钢 号		硬度值 HRC	
		形 状 简 单	形 状 复 杂	模 面	燕 尾
锤 锻 模	小 型 (高度 < 275mm)	5CrMnMo 5Cr2MnMo	5CrNiMo	42 ~ 39	35.0 ~ 39.5
	中 型 (高度 275 ~ 325mm)	5CrMnMo	5CrNiMo	42 ~ 39	32.5 ~ 37.0
	大 型 (高度 325 ~ 375mm)	5CrNiMo, 5CrNiW, 5CrNiTi		40 ~ 35	30.5 ~ 35.0
	特 大 型 (高度 375 ~ 500mm)	5CrNiMo, 5CrNiW, 5CrNiTi		37 ~ 34	27.5 ~ 35.0
机 锻 模	切 边 模	5CrMnMo, 5CrNiMo		27.5 ~ 34	
	热挤压模	3Cr2W8V, 5CrNiMo, 3Cr3Mo3W2V, 5Cr4W5Mo2V		44 ~ 52	
	热 冲 模	3Cr2W8V, W18Cr4V		47 ~ 51	56 ~ 60
挤压温锻模		5Cr4W2Mo3V		45 ~ 60	
压 铸 模	压 铸 锌 合 金	40CrMo, 3Cr2W8V, CrWMn, 4Cr5MoSiV		50HRC 58 ~ 63HRC(碳氮共渗)	
	压 铸 铝 合 金	3Cr2W8V, 3Cr3Mo3W2V, 3Cr3Mo3VNb, 4Cr5MoSiV 马氏体时效钢, 铬氮模具钢		42 ~ 48	44 ~ 50
	压 铸 铜 合 金	3Cr2W8V, 3Cr3Mo3V, TZM, 3Cr3Mo3Co3V, BK30 硬质合金			
	压铸黑色金属	TZM, 铬钴镁铜, 3W23Cr4MoV, 3Cr2W8V			
不锈钢中温辊锻模		5Cr4W5Mo2V		54 ~ 58	
连杆辊锻模		3Cr2W8V, 3Cr3Mo3W2V, 3Cr3Mo3VNb(HM3)		44 ~ 52	

注：5Cr2MnMo 为堆焊用钢。

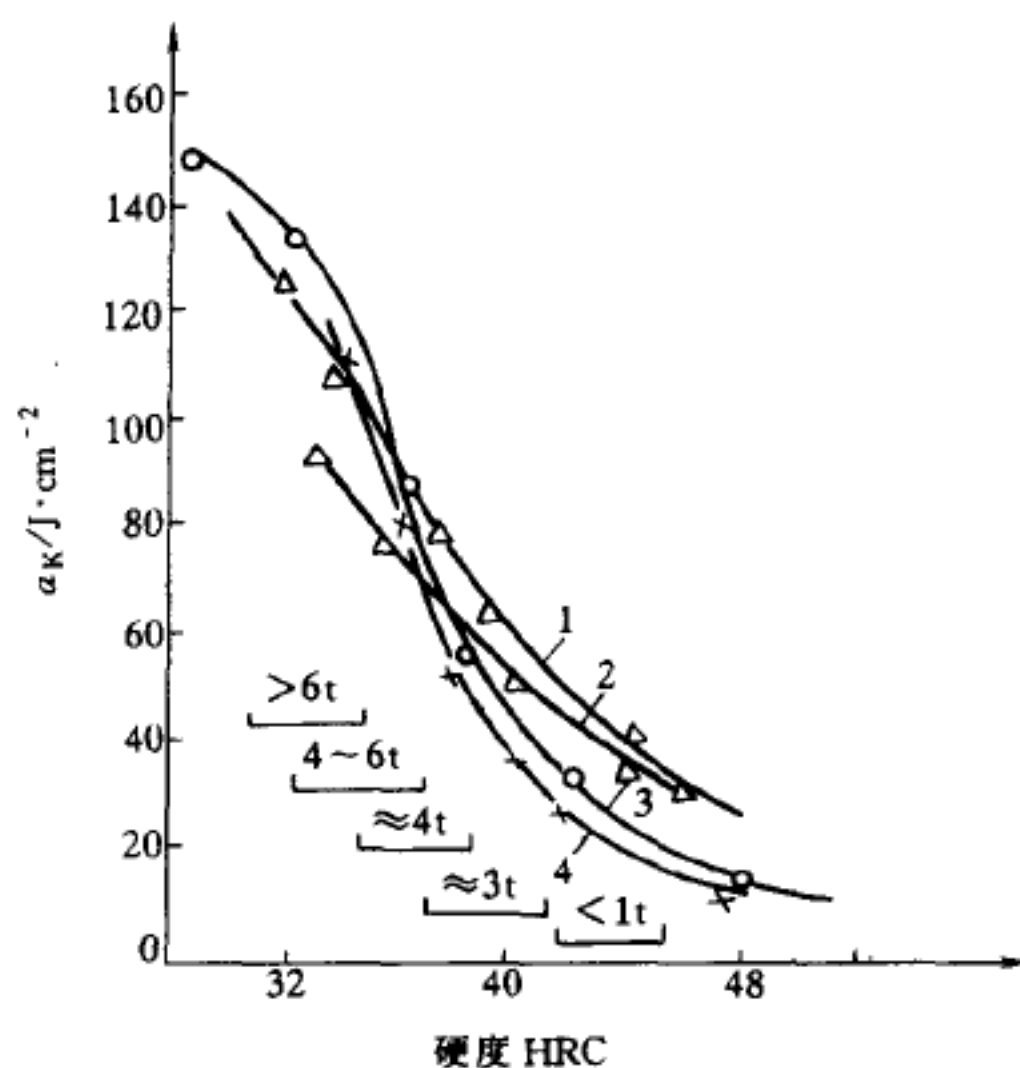


图 16-124 锤锻模用钢的硬度与冲击韧度的关系

1—5CrNiW 钢 2—5CrNiTi 钢 3—5CrNiMo 钢 4—5CrMnMo 钢

注：所标吨数系指锻锤的重量

(2) 热处理（表 16-53 ~ 表 16-67，图 16-125 ~ 图 16-130）

表 16-53 热作模具钢退火工艺

钢 号	加 热		等 温		冷却方式	硬度 HBW
	温度/℃	时间/h	温度/℃	时间/h		
5CrNiMo	760 ~ 780	4 ~ 8			①	197 ~ 241
	760 ~ 780	4 ~ 6	680	4 ~ 6	②	197 ~ 241
5CrMnMo	760 ~ 780	4 ~ 6			①	197 ~ 241
	850 ~ 870	2 ~ 4	680	4 ~ 6	②	197 ~ 241
5CrNiW	780 ~ 800	4 ~ 6			①	197 ~ 241
5Cr2NiMoVSi	790 ~ 810	2 ~ 4	720 ~ 730	4 ~ 6	②	220 ~ 230
3Cr2W8V	840 ~ 860	2 ~ 4			①	207 ~ 255
	830 ~ 850	2 ~ 3	700 ~ 720	3 ~ 4	②	207 ~ 255
3Cr3Mo3W2V	850 ~ 870	2 ~ 4	710 ~ 730	4 ~ 6	②	197 ~ 229
5Cr4W05Mo2V	850 ~ 870	2 ~ 3	720 ~ 740	3 ~ 4	②	≤255
4Cr3Mo3W4VTiNb	840 ~ 860	3	710 ~ 730	4	②	170 ~ 229
4Cr5MoSiV	860 ~ 890	2 ~ 4			①	≤229
4Cr5MoSiV1						
4Cr5W2VSi	860 ~ 880	3 ~ 4			①	≤229
5Cr4Mo3SiMnVA1	860	2 ~ 3	720	3 ~ 4	②	≤229
5Cr4W2Mo2VSi	880 ~ 900	2 ~ 4	750 ~ 780	8 ~ 12	②	≤207

① <30℃/h 炉冷，至 500℃ 出炉。

② 炉冷至 ≤500℃ 出炉空冷。

表 16-54 热作模具低温退火工艺

模具名称	钢号	加热温度/℃	保温时间	冷却方式
热锻模、切边模	5CrMnMo、 5CrNiMo	650 ~ 680	1.5 ~ 2min/mm	空冷
热挤模、热压模 高速锻模、压铸模	3Cr2W8V	720 ~ 750	2 ~ 3h	
热压模	W18Cr4V	720 ~ 750	2 ~ 3h	

表 16-55 不同尺寸模块的退火工艺规范

锤锻模尺寸规格/mm	600 ~ 650℃ 预热时间/h	升温	保温温度/℃	保温时间/h	冷 却
250 × 250 × 250	2	随	830 ~ 850	4 ~ 5	随炉冷却(以 50℃/h)至 500℃ 以下出炉空冷
300 × 300 × 300	3	炉	830 ~ 850	5 ~ 6	
350 × 350 × 350	4	缓	830 ~ 850	6 ~ 7	
400 × 400 × 400	5	慢	840 ~ 860	7 ~ 8	
450 × 450 × 450	6	升	840 ~ 860	8 ~ 9	
500 × 500 × 500	7	温	840 ~ 860	9 ~ 10	

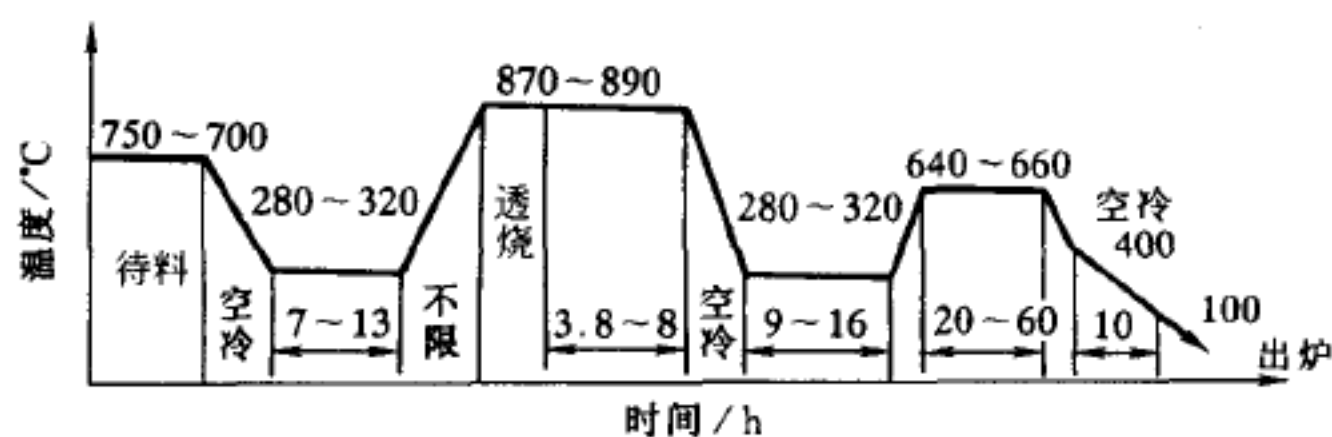


图 16-125 5CrMnSiMoV 钢模块普通退火与防止白点退火工艺曲线

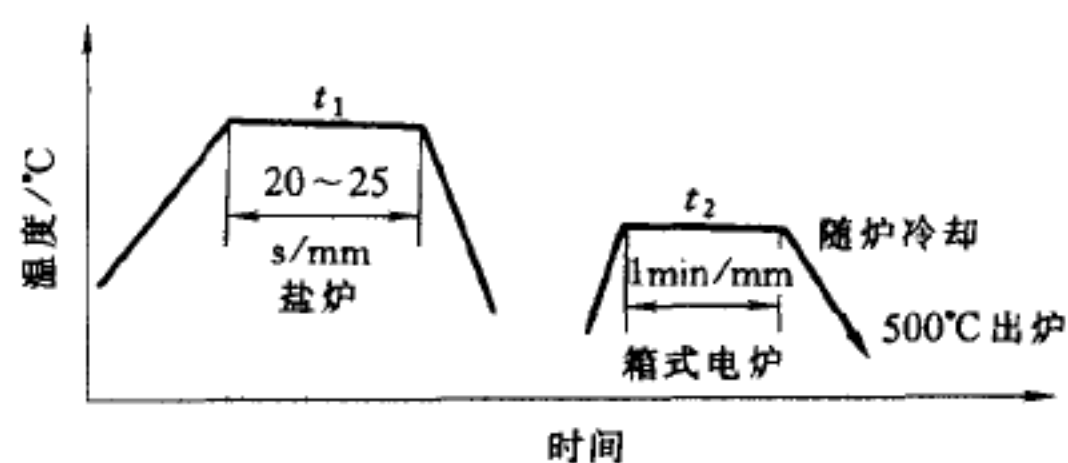


图 16-126 快速球化退火工艺

t_1 : 3Cr2W8V, 1050℃; 3Cr3Mo3VNb, 1030℃, 5Cr4W5Mo2V, 1100℃
 t_2 : 3Cr2W8V, 850 ~ 870℃; 3Cr3Mo3VNb, 850 ~ 870℃, 5Cr4W5Mo2V, 850 ~ 870℃

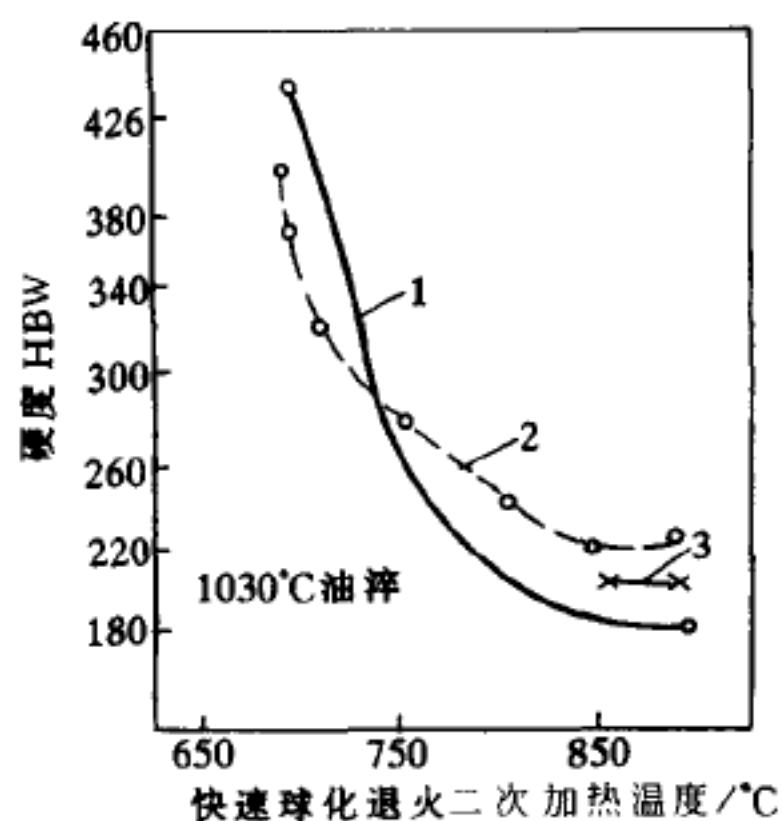


图 16-127 3Cr3Mo3VNb 钢快速球化退火二次加热温度与硬度的关系

1—3Cr3Mo3VNb 2—3Cr2W8V
 3—5Cr4W5Mo2V

表 16-56 三种热挤压模具钢快速球化退火后的硬度

钢 号	快速球化退火的加热温度/℃		硬 度 HBW
	一次加热(t_1)	二次加热(t_2)	
3Cr2W8V	1050	850 ~ 870	220
3Cr3Mo3VNb	1030	850 ~ 870	180 ~ 200
5Cr4W5Mo2V	1100	850 ~ 870	200

注：一次和二次加热时，不需保温、等温时间，到温后均热即可。

表 16-57 热作模具钢淬火工艺

钢 号	淬火温度/℃	冷却介质	硬度 HRC
5CrNiMo	840 ~ 860	油	58 ~ 60
5CrNiW	840 ~ 860	油	55 ~ 59
5CrNiTi	830 ~ 850	油	55 ~ 58
5CrMnMo	830 ~ 850	油	52 ~ 58
5Cr2NiMoVSi	940 ~ 970	油	60 ~ 61
3Cr2W8V	1050 ~ 1100	油	50
	1150 ~ 1160	油	53 ~ 55
3Cr3Mo3W2V	1030 ~ 1090	油	52 ~ 55
3Cr3Mo3VNb	1060 ~ 1090	油、盐水	46 ~ 48
5Cr4W5Mo2V	1130 ~ 1150	油	56 ~ 60
4Cr3Mo3W4VTiNb	1160 ~ 1200	油	55 ~ 57
4Cr5MoSiV	1000 ~ 1050	油、空气	56 ~ 58

表 16-58 淬火加热保温时间对 3Cr3Mo3VNb 钢硬度的影响

处 理 状 态	淬 火 加 热 保 温 时 间/min					
	1	2	4	6	8	20
	硬 度 HRC					
1060℃油淬	42.0	45.0	47.0	47.0	47.5	48.0
600℃第一次回火后	43.0	45.0	48.0	48.5	48.0	49.0
570℃第二次回火后	42.5	45.5	47.5	48.0	48.5	48.5

表 16-59 热作模具淬火前的预冷方式

钢 号	预冷温度/℃	介质
5CrMnMo, 5CrNiMo	780	空气
3Cr2W8V, 4Cr5W2VSi	830 ~ 850	空气
	830 ~ 850	中温盐浴
W18Cr4V	1050 ~ 1100	空气

表 16-60 热作模具淬火冷却方式

模具类型	冷却介质	介质温度/℃	冷却方式
形状复杂的小型压铸模			空冷
热锻、切边、热冲、热挤、高速锻模及大型压铸模	油	< 80	冷至 200℃左右然后空冷
大型易畸变的压铸模	热油	80 ~ 150	冷至 200℃左右然后空冷
形状较复杂的压铸、热挤及高速锻模	50% KNO ₃ + 50% NaNO ₂	350 ~ 400	分级冷却时间为 0.2 ~ 0.3min/mm, 随后空冷
形状较复杂的压铸、热挤及高速锻模	30% KCl + 20% NaCl + 50% BaCl ₂ 或 30% CaCl ₂ + 20% NaCl + 50% BaCl ₂	500 ~ 650	分级冷却时间为 0.3 ~ 0.5min/mm, 随后空冷

注：1. 560 ~ 620℃是 3Cr2W8V 钢过冷奥氏体稳定区，在此区内等温不会发生奥氏体分解，用此法淬火可显著减小畸变。

2. 350 ~ 400℃是 3Cr2W8V 钢贝氏体转变温度的上限，因此不宜在此区停留时间过长，以免影响淬火后的硬度。

3. 冷至 200℃从油槽中取出后应立即回火，不要冷到室温，以防模具开裂。

表 16-61 5CrNiMo 模具淬火预冷时间和油冷时间

锻模高度/mm	预冷时间/min	油中冷却时间/min
280 ~ 350	8 ~ 12	40 ~ 50
351 ~ 400	12 ~ 16	50 ~ 60
401 ~ 450	16 ~ 20	60 ~ 70

表 16-62 锤锻模用钢的淬透深度和在 600 ~ 700℃时的硬度

钢 号	淬 透 深 度	在 600 ~ 700℃时的硬度 HBW
5CrNiMo	300mm × 300mm × 400mm 经 820℃加热淬火, 650℃回火 10h 后, 整个截面硬度一致	207 ~ 125
5CrMnMo	90 ~ 100mm	175 ~ 115
5CrNiW	350mm 正方体, 经 830 ~ 880℃加热后淬火, 有 65 ~ 75mm 深度的高硬度区	202 ~ 120
5CrNiTi	350mm 正方体, 830 ~ 880℃加热淬火后, 有 70 ~ 100mm 的高硬度区	179 ~ 165
5Cr2NiMoVSi	160mm × 200mm 截面可淬透	

表 16-63 热作模具回火工艺

钢 号	淬火温度/℃	回 火 工 艺				回火后硬度 HRC
		温度/℃	时间/h	次数	冷却方式	
5CrMnMo	830 ~ 850	460 ~ 490	2	≥ 1	空	42 ~ 47
		490 ~ 520	2	≥ 1	空	38 ~ 42
		520 ~ 550	2	≥ 1	空	34 ~ 38
5CrNiTi	830 ~ 850	475 ~ 485	> 2	≥ 1	空	41 ~ 45
		485 ~ 510	> 2	≥ 1	空	39 ~ 43
		600 ~ 620	> 2	≥ 1	空	33 ~ 37
5CrNiW	840 ~ 860	520 ~ 540	> 2	≥ 1	空	41 ~ 45
		530 ~ 550	> 2	≥ 1	空	39 ~ 43
		590 ~ 610	> 2	≥ 1	空	37 ~ 38
3Cr2W8V	1050 ~ 1100	560 ~ 580	> 2	> 1	空、油	44 ~ 48
		600 ~ 640	> 2	> 1	空、油	40 ~ 44
	1100 ~ 1150	600 ~ 620	≥ 1	≥ 2	空、油	44 ~ 48
		640 ~ 660	≥ 1	≥ 2	空、油	40 ~ 44
4Cr5W2VSi	1050 ~ 1100	580 ~ 620	≥ 2	≥ 2	空、油	48 ~ 52
		520 ~ 560	≥ 2	≥ 2	空、油	52 ~ 56
3Cr3Mo3W2V	1030 ~ 1050	650 ~ 660	≥ 2	≥ 2	空、油	38 ~ 44
		600 ~ 620	≥ 2	≥ 2	空、油	48 ~ 52
5Cr4Mo3SiMnVAI	1090 ~ 1100	580 ~ 600	≥ 2	≥ 2	空、油	53 ~ 55
4Cr3Mo3W4VNb	1170 ~ 1190	620 ~ 640	≥ 2	≥ 2	空、油	50 ~ 52
3Cr3Mo3VNb	1070 ~ 1090	610 ~ 630	≥ 2	≥ 2	空、油	45 ~ 47
5Cr4W5Mo2V	1120 ~ 1140	620 ~ 640	≥ 2	≥ 2	空、油	49 ~ 51

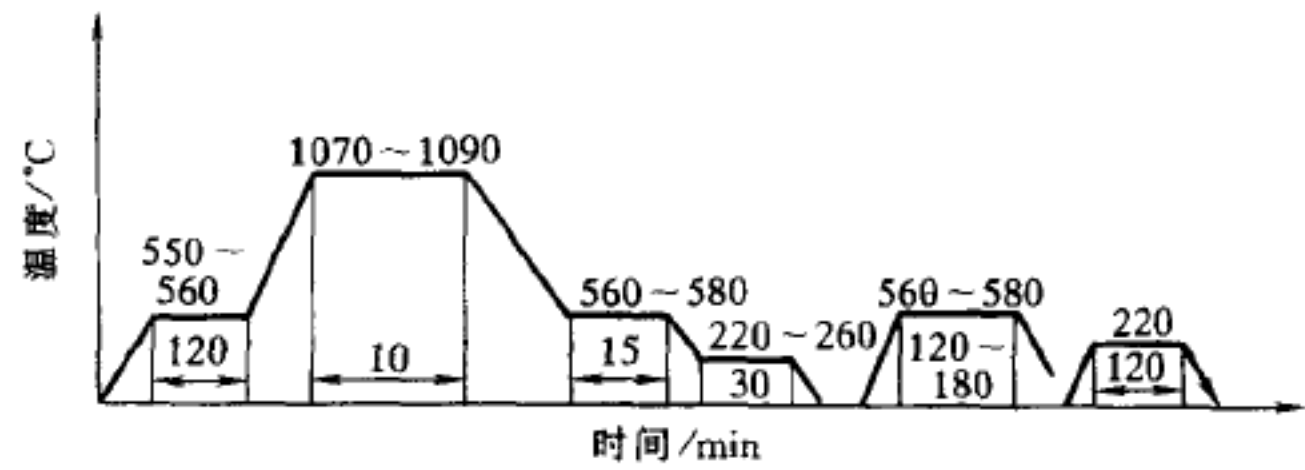


图 16-128 3Cr2W8V 钢制热挤压模具的热处理工艺曲线

表 16-64 压铸锌合金用模具的热处理工艺

模 具 名 称	模具材料	热 处 理 工 艺	硬度 HRC
小衬模	CrWMn	800 ~ 820℃ 盐炉加热, 淬油(油温 80 ~ 100℃); 410 ~ 430℃ × 1h 回火	50
小模数齿轮压铸模 (冷挤压成形)	DT1 工业纯铁	中温固体碳氮共渗后直接淬火 渗剂: 黄血盐 15% + 碳酸钡 15% + 木炭 70%, 用少许锭子油拌匀 工艺: 820 ~ 840℃ × 4 ~ 5h, 出炉开箱直接油冷, 180 ~ 200℃ 回火 1 ~ 2h	表面硬度: 58 ~ 63

表 16-65 压铸铜合金用模具的热处理工艺参数

钢 号	退火温度 /℃	淬 火		回火温度 /℃	硬 度 HB
		温度/℃	冷却介质		
3Cr2W8V	850	1100 ~ 1150	油、空气, 500℃ 盐浴等温淬火	670 ~ 700	290 ~ 375
3Cr2W9Co5V	760 ~ 800	1130 ~ 1180	油、空气, 500℃ 盐浴等温淬火	670 ~ 700	290 ~ 375
3Cr3Mo3V	710 ~ 750	1020 ~ 1070	油、空气, 500℃ 盐浴等温淬火	670 ~ 700	290 ~ 375

表 16-66 压铸铝合金用模具的淬、回火工艺

钢 号	淬、回火工艺	硬度 HRC
3Cr2W8V	550 ~ 600℃ 预热, 1050℃ 加热, 预冷至 850℃ 油淬, 在 610℃, 580℃ 进行两次回火(结合进行渗氮或氮碳共渗)	40 ~ 45 (渗氮表面为 56 ~ 58HRC)
1Cr9W	1120 ~ 1140℃ 加热, 油淬, 再进行 560 ~ 570℃ 回火	42 ~ 45
18Ni250	固溶温度 820℃, 时效温度为 482℃	50
2Cr10MoSiVWNiN	1010 ~ 1050℃ 加热, 油淬, 再在 565 ~ 590℃ 回火	35 ~ 39

表 16-67 压铸钢铁用模具的材料及其热处理

材料及热处理	压铸零件及材料	寿命/次	失效原因
3Cr2W8V 一般热处理	T8 钢肋骨剪(重量 97g)	数十至数百次	大裂纹
3Cr2W8V + 表面渗铝	T8 钢肋骨剪(重量 97g)	1190	网状裂纹
	2Cr13, 汽轮机叶片	100 余次	网状裂纹
3Cr2W8V + Cr-Al-Si 三元共渗	2Cr13 汽轮机叶片	100 余次	网状裂纹
3W23Cr4MoV	45 钢齿轮(重量 690g)	100 余次	

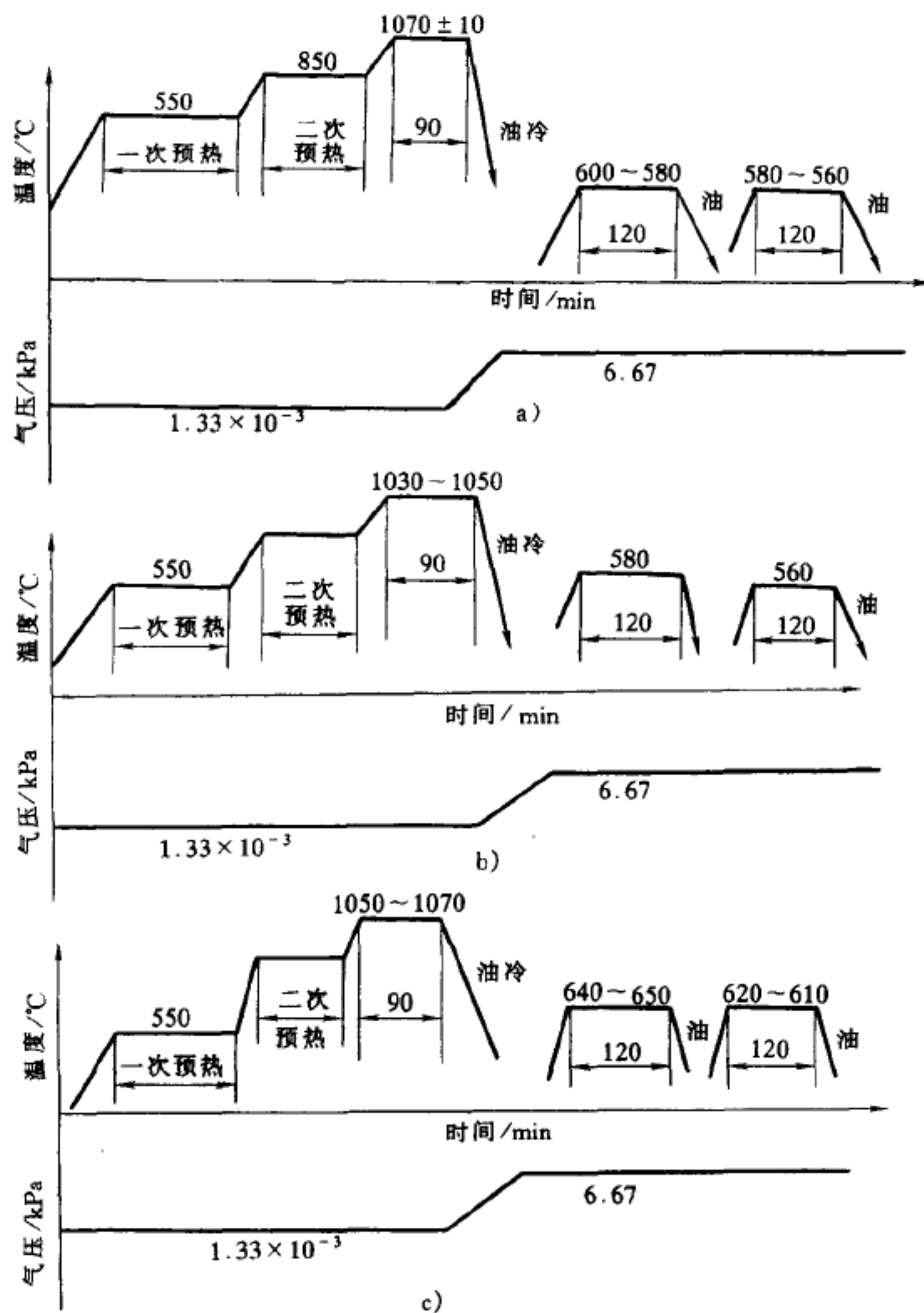


图 16-129 3Cr2W8V, 3Cr3Mo3W2V, 3Cr3Mo3VNb, 钢制压铸铝合金的模具的热处理工艺曲线
a) 3Cr2W8V b) 3Cr3Mo3W2V c) 3Cr3Mo3VNb

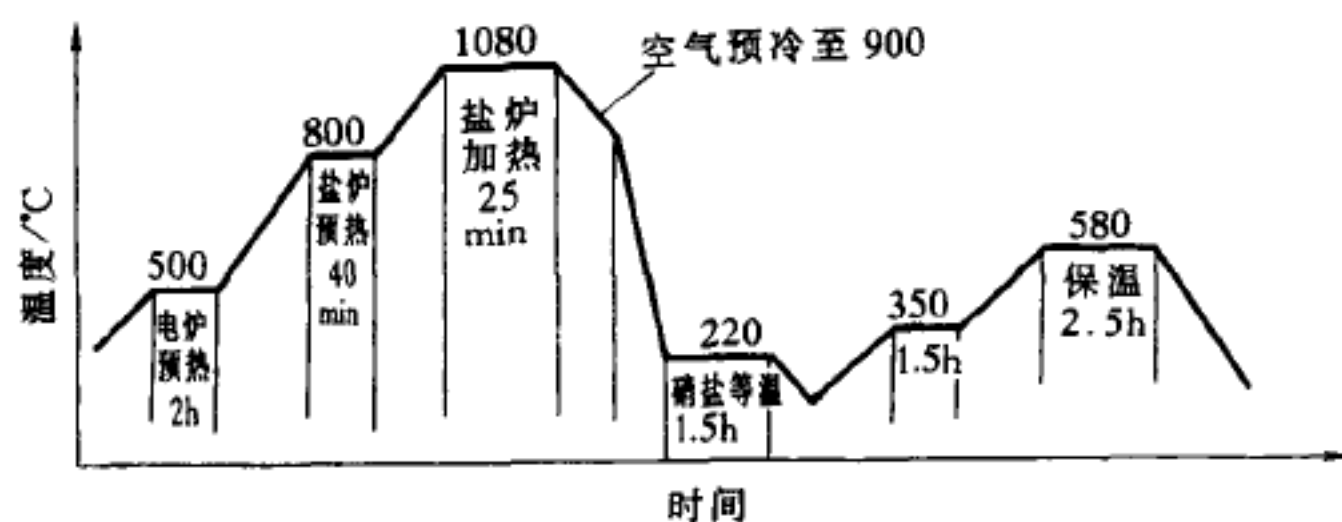


图 16-130 经 Cr-Al-Si 三元共渗后的 3Cr2W8V 钢制模具的热处理工艺曲线(压铸叶片模具尺寸为 300mm × 129mm × 60mm)

(3) 力学性能

1) 5CrMnMo(图 16-131 和图 16-132)

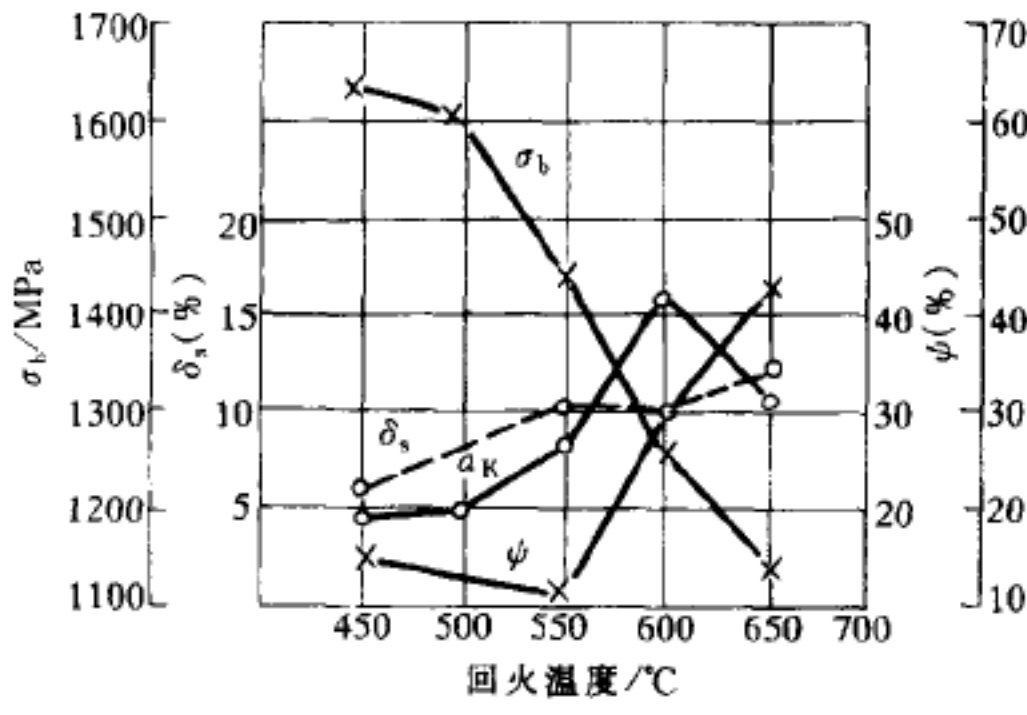


图 16-131 不同温度回火时钢的室温力学性能(850℃油淬)

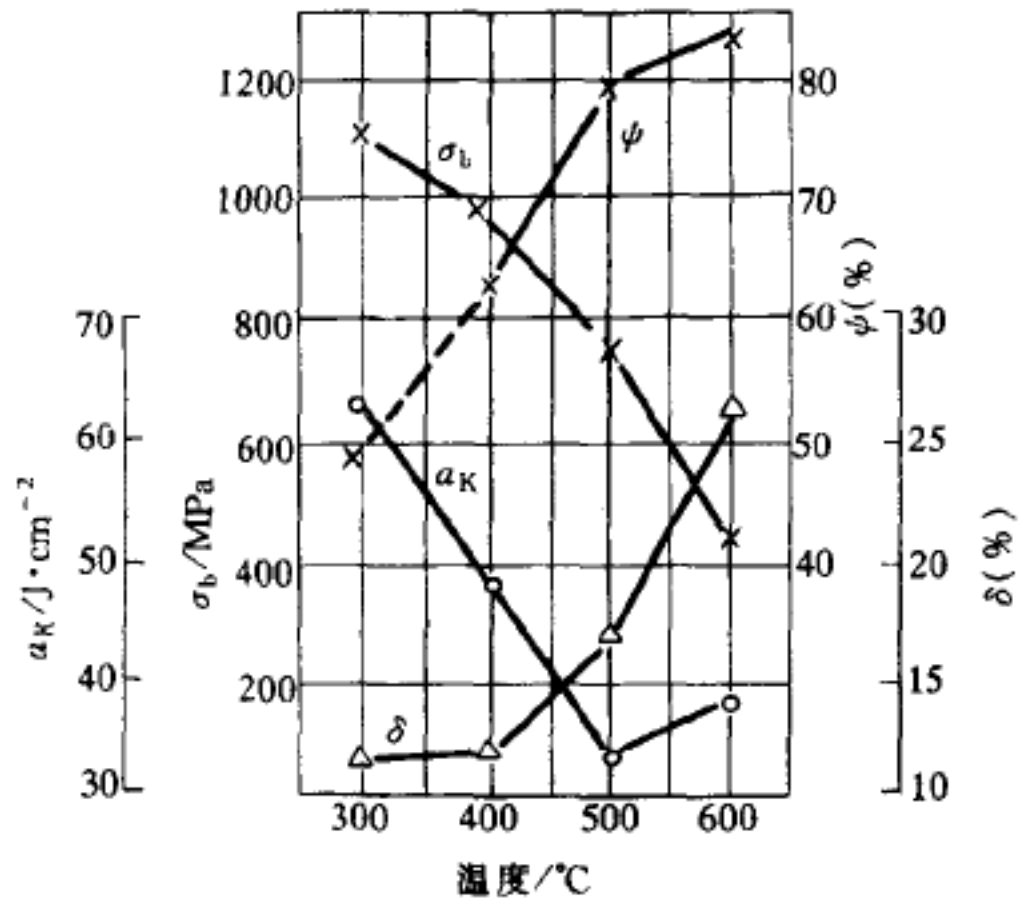


图 16-132 钢的高温力学性能(850℃空淬;600℃回火)

2) 5CrNiMo(图 16-133 和图 16-134)

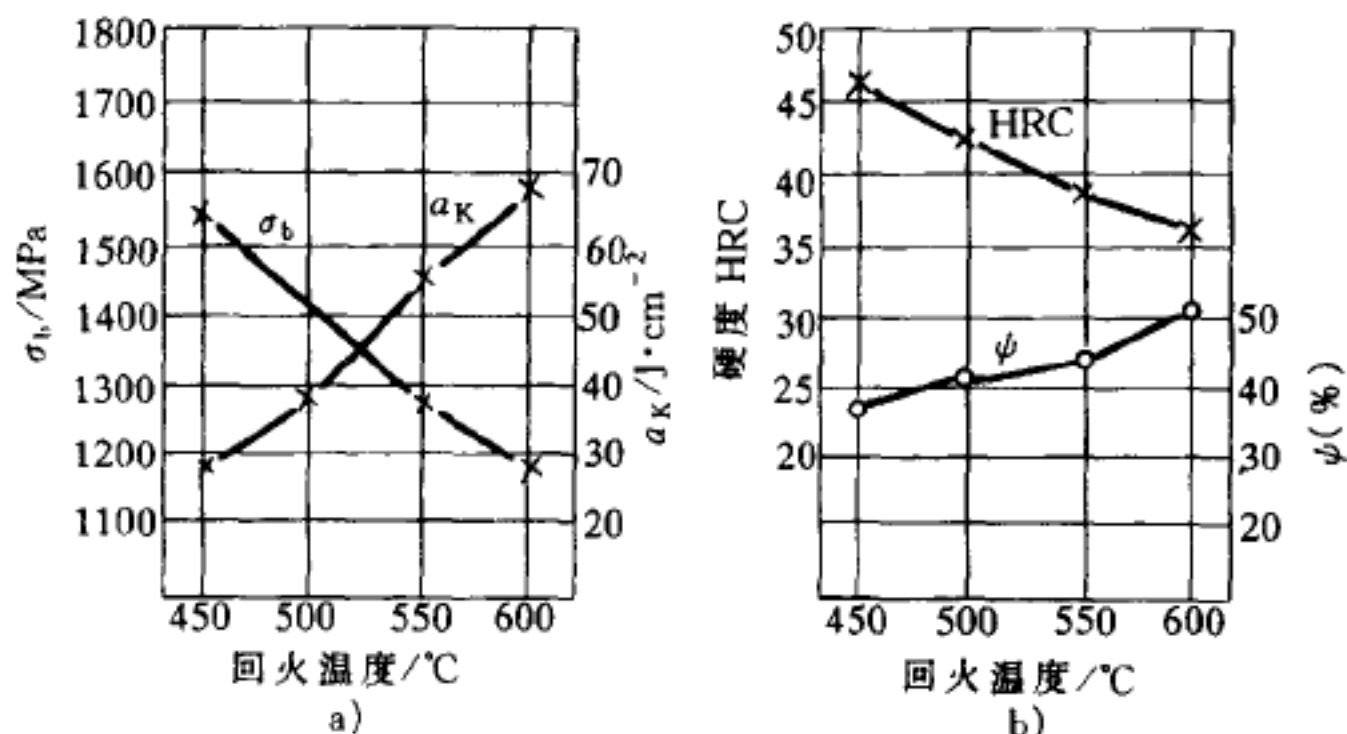


图 16-133 不同回火温度的室温力学性能(840℃淬火)

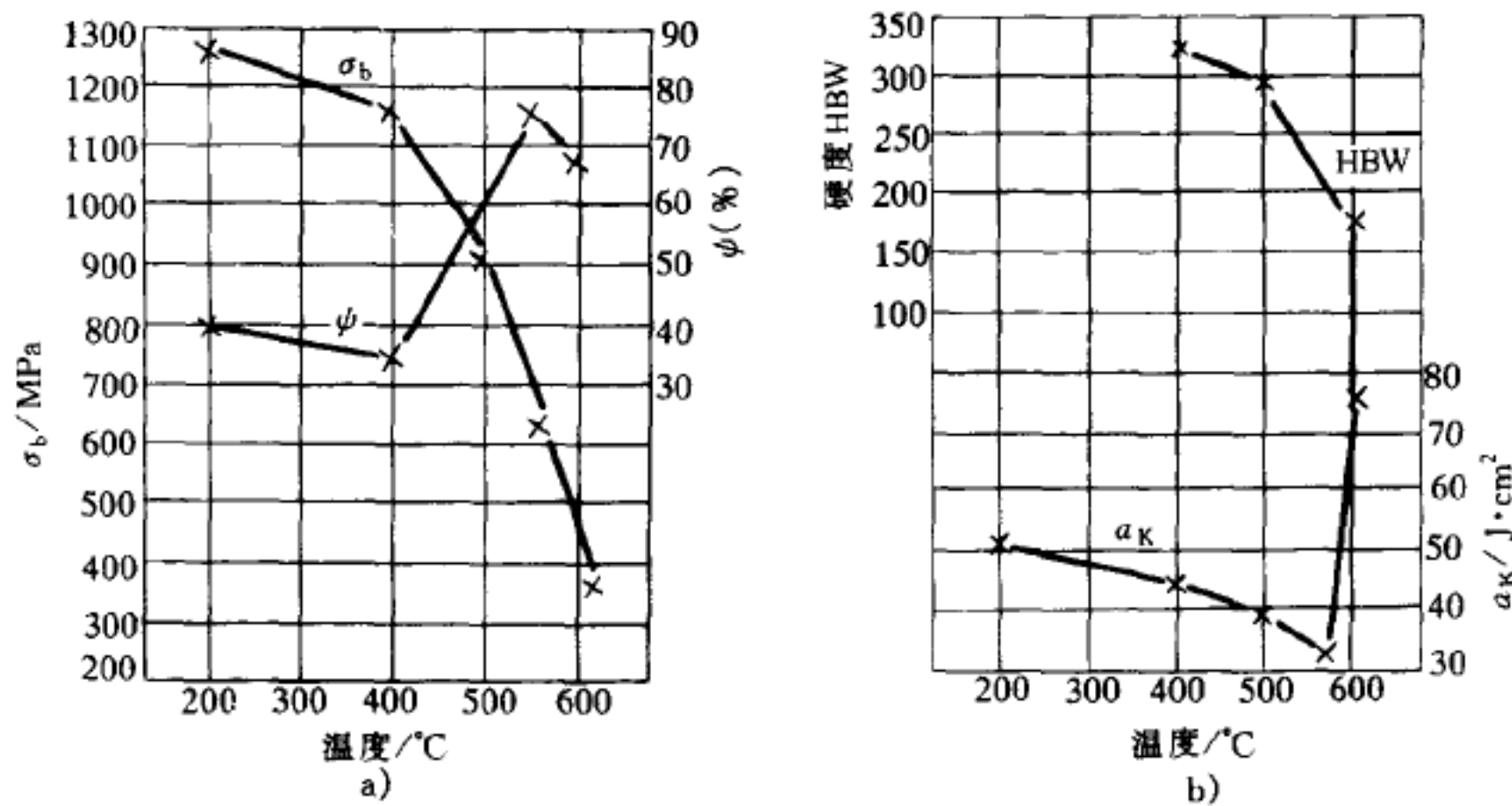


图 16-134 高温力学性能(850℃淬火,550℃回火)

3) 3Cr2W8V(图 16-135 ~ 图 16-140)

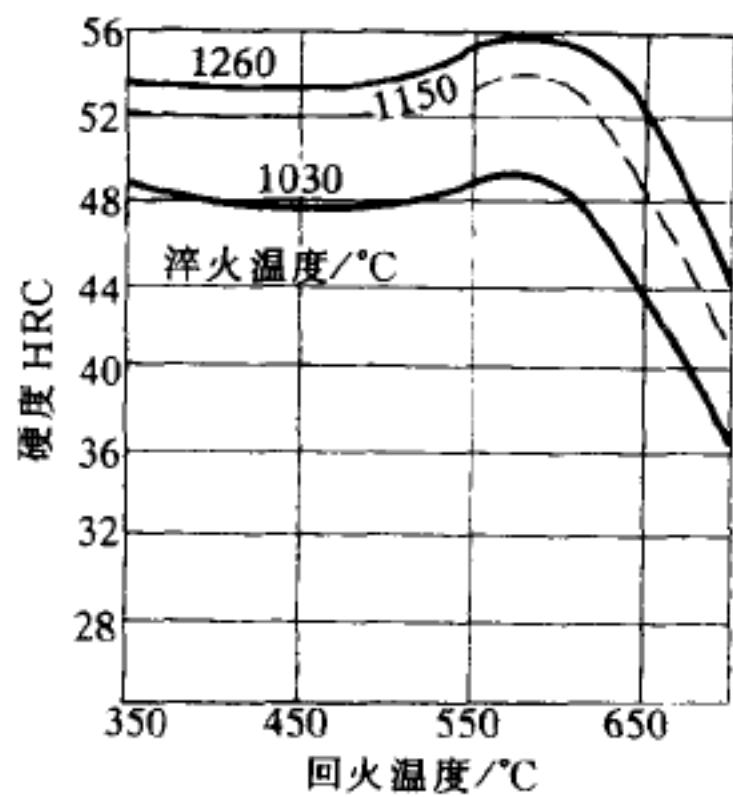


图 16-135 硬度与回火温度的关系

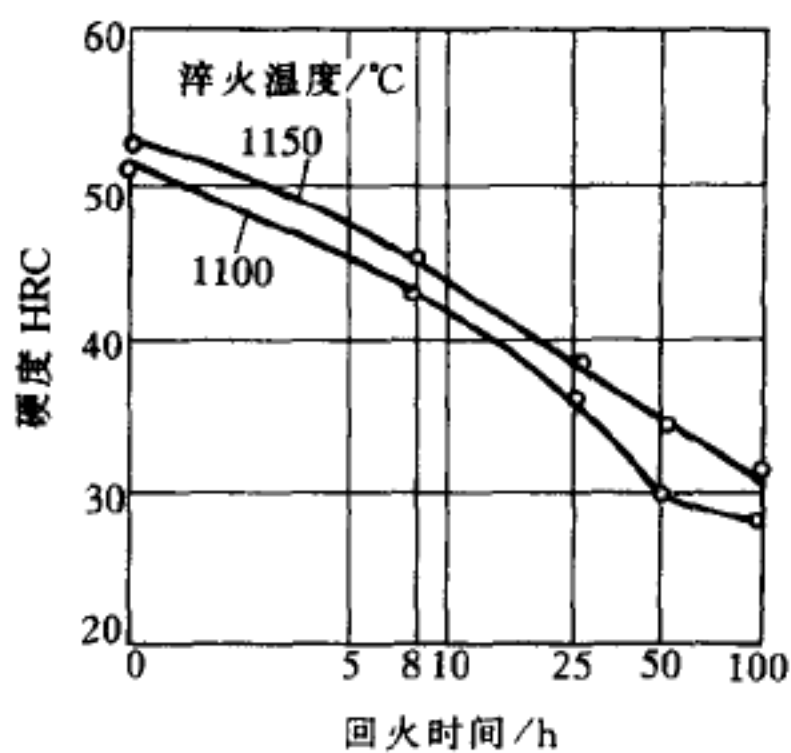


图 16-137 耐回火性

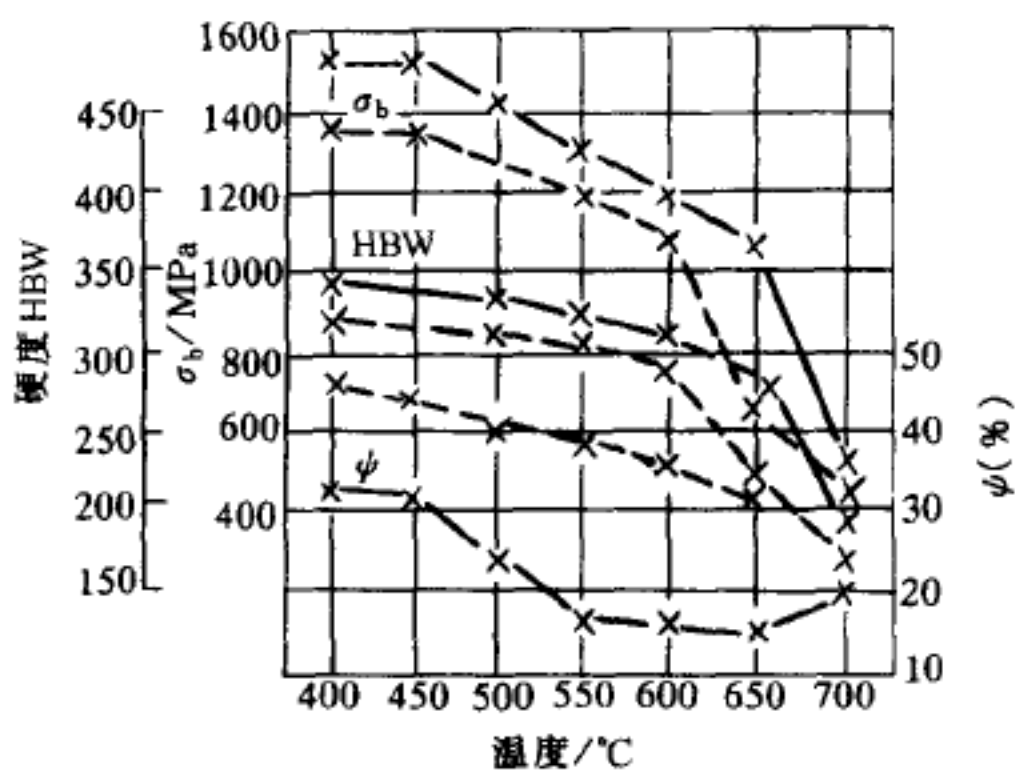
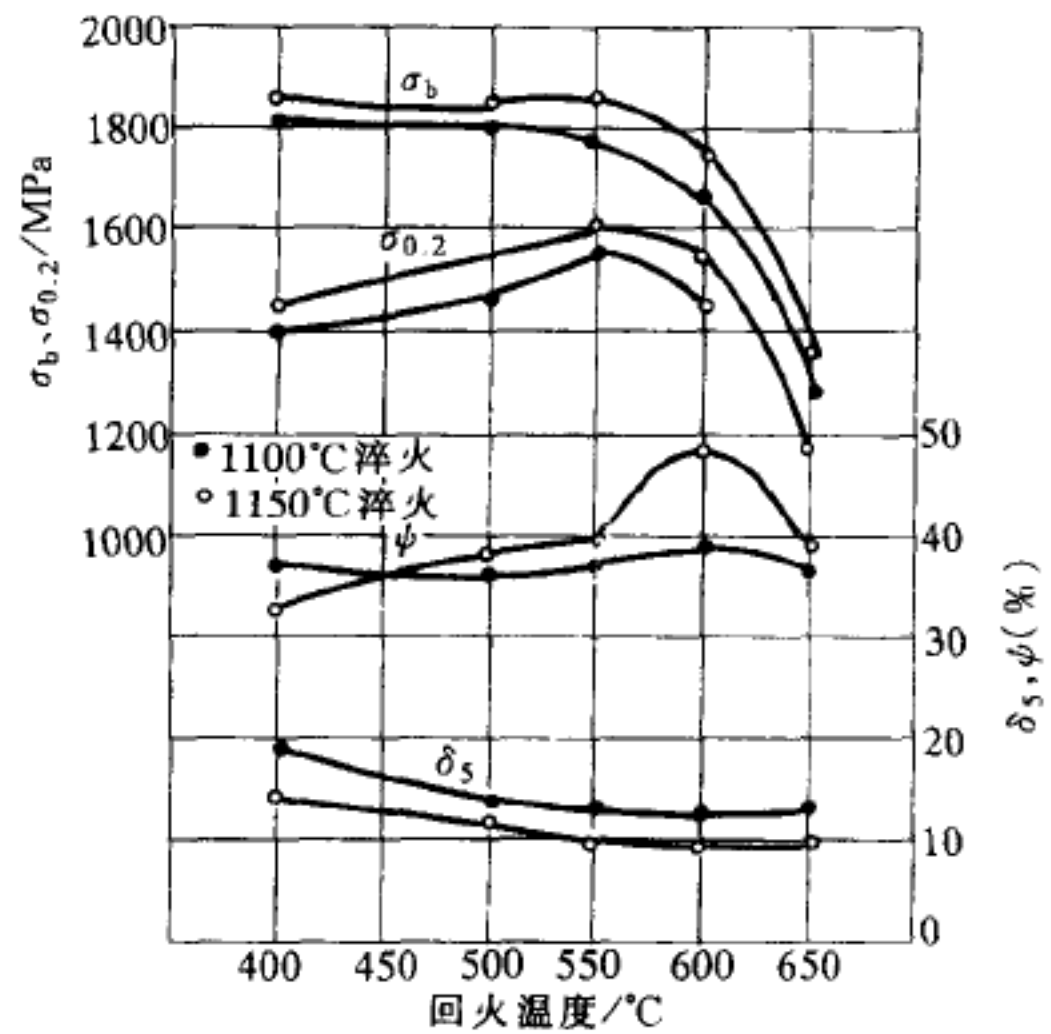
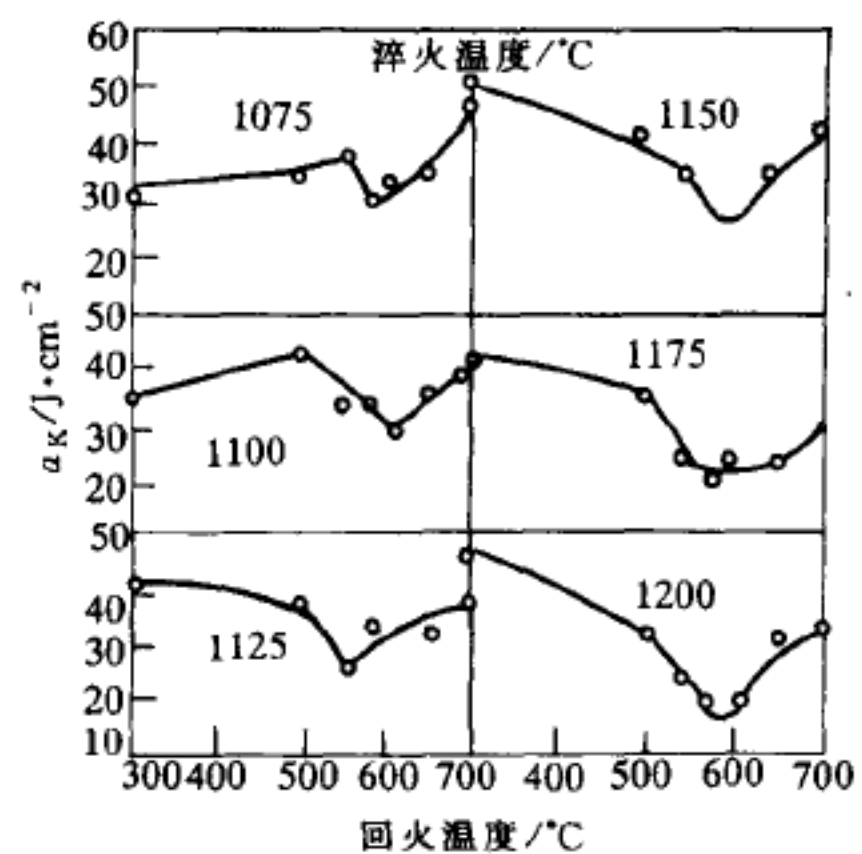
图 16-139 高温力学性能
(1100°C 淬火, 600°C 回火)图 16-136 不同温度淬火和不同
温度回火后的力学性能

图 16-138 冲击韧性（a_K）与回火温度的关系

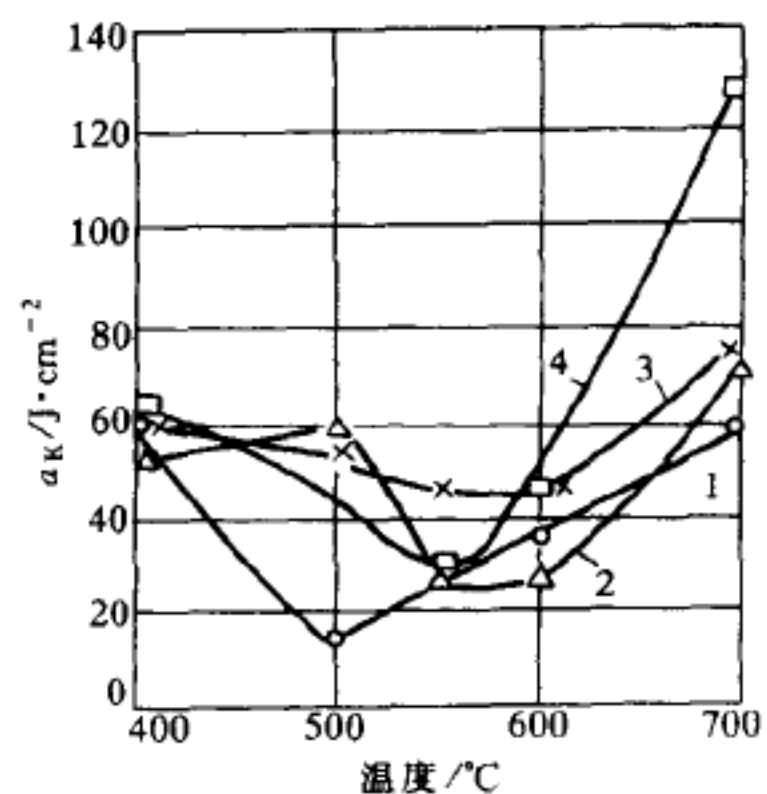
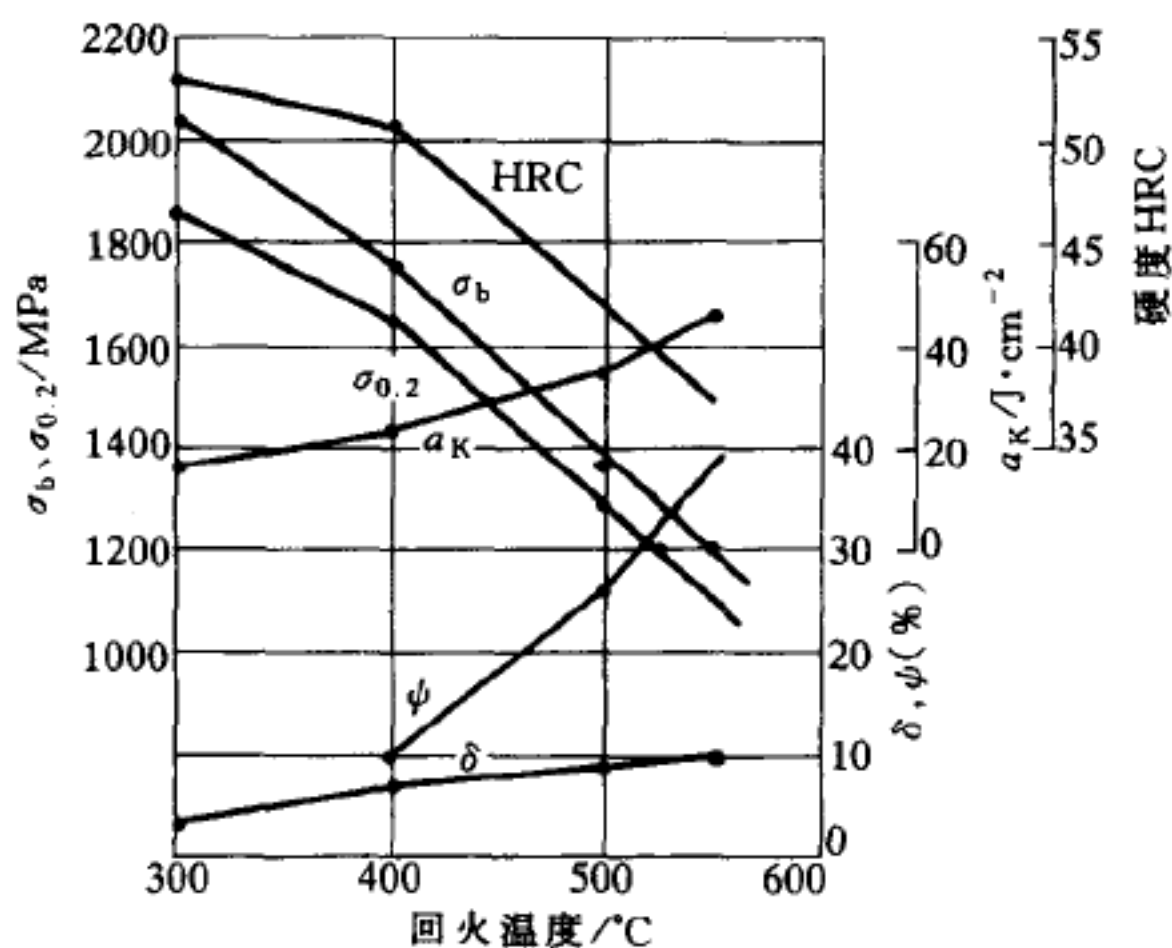
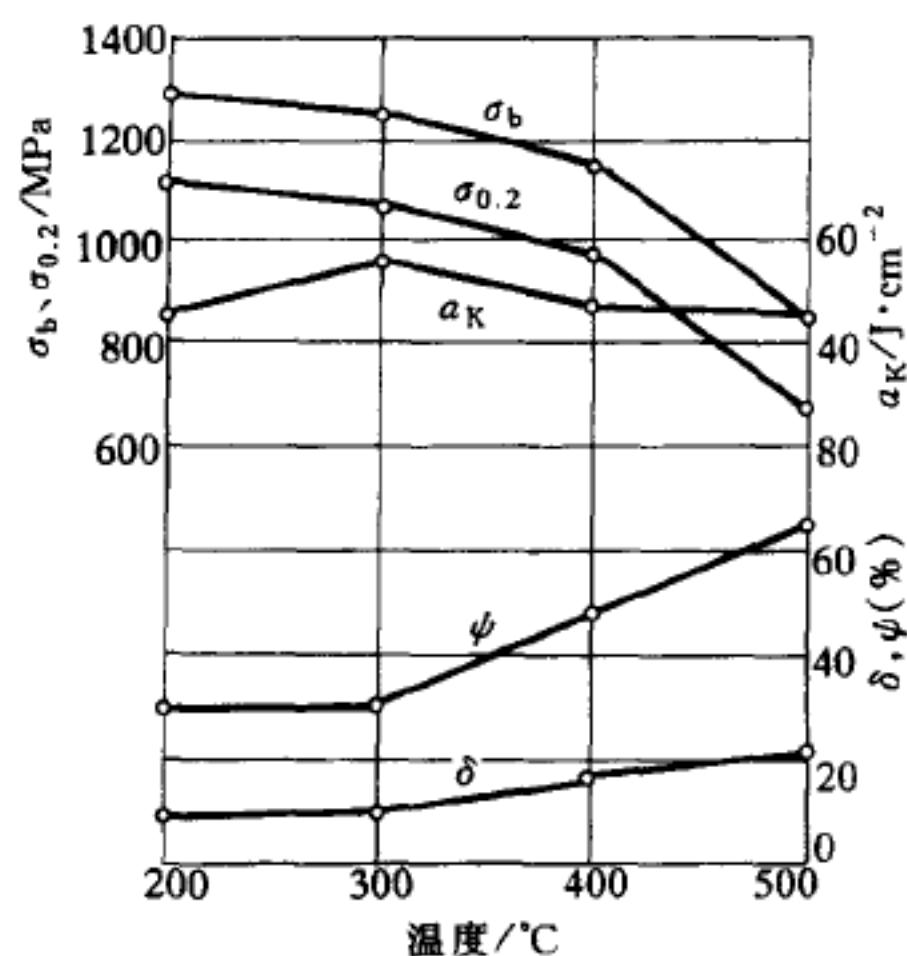


图 16-140 高温冲击韧性

1—1100°C 淬火 550°C 回火 2—1100°C 淬火 620°C 回火
3—1150°C 淬火 550°C 回火 4—1150°C 淬火 620°C 回火

4) 8Cr3(图 16-141 和图 16-142)

图 16-141 不同温度回火后的室温力学性能
(870℃油淬后回火)图 16-142 高温力学性能
(870℃油淬, 570℃回火)

5) 4Cr5MoVSi(图 16-143 ~ 图 16-148)

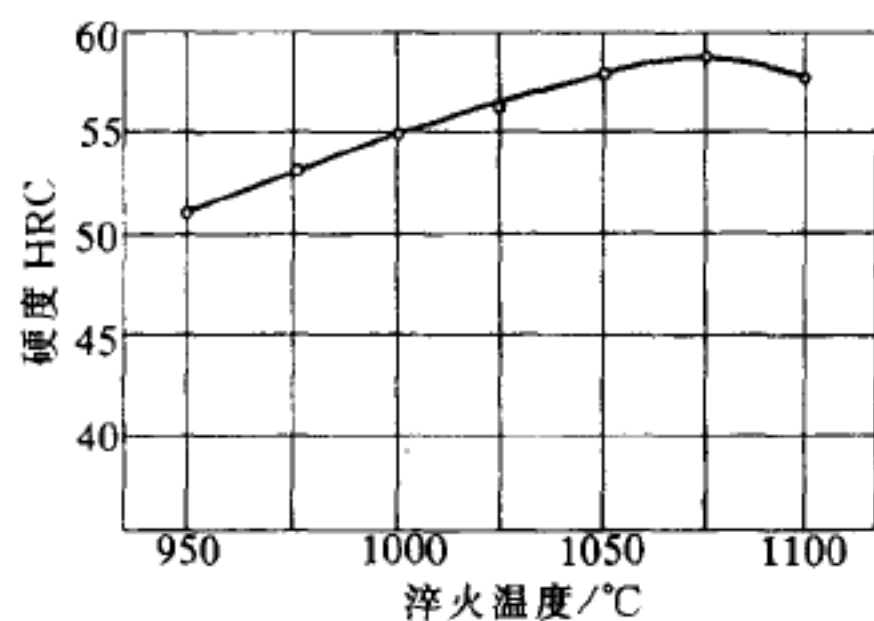


图 16-143 淬火硬度与淬火温度的关系(空淬)

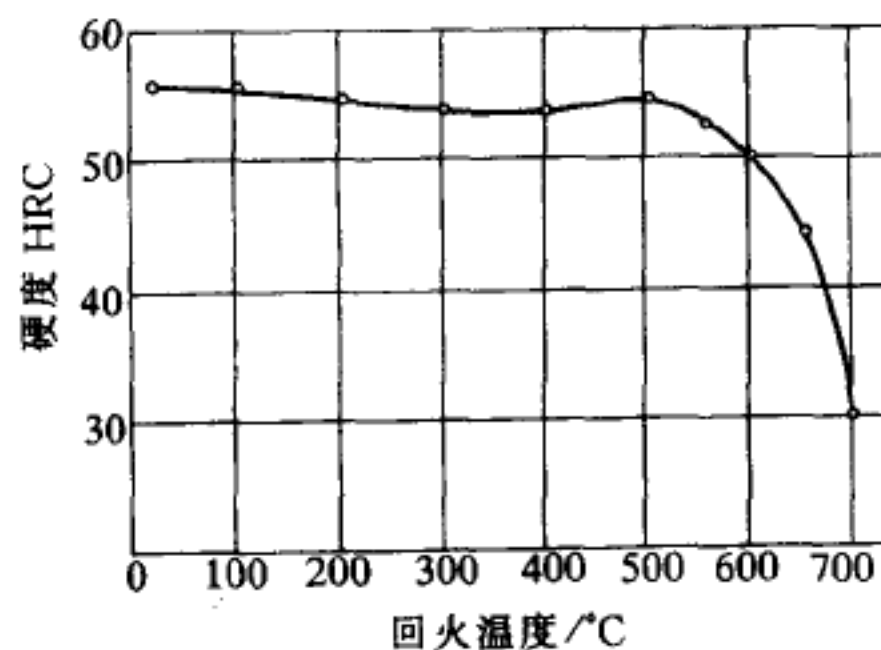


图 16-144 硬度与回火温度的关系(1030℃空冷淬火)

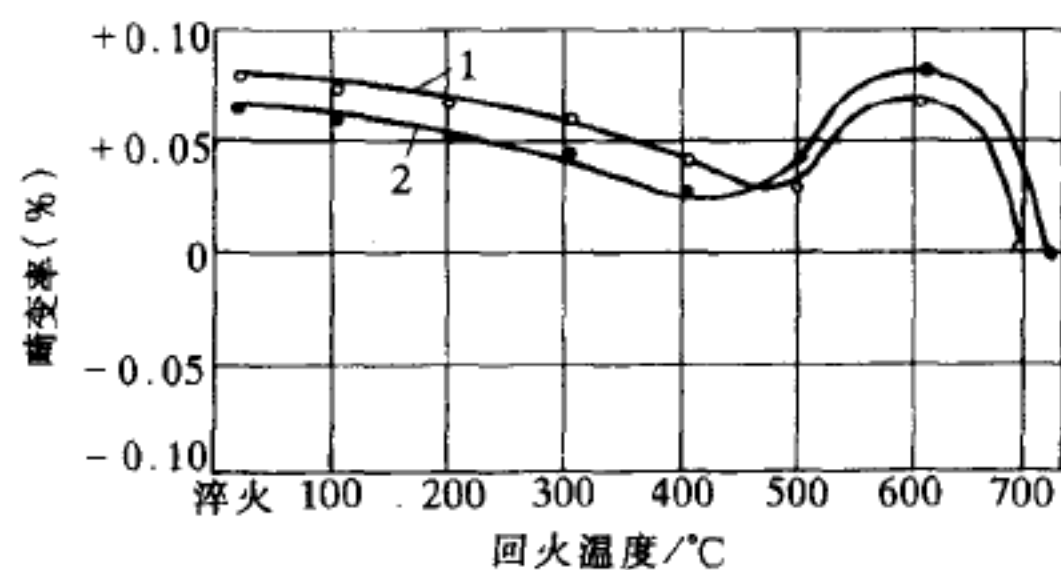
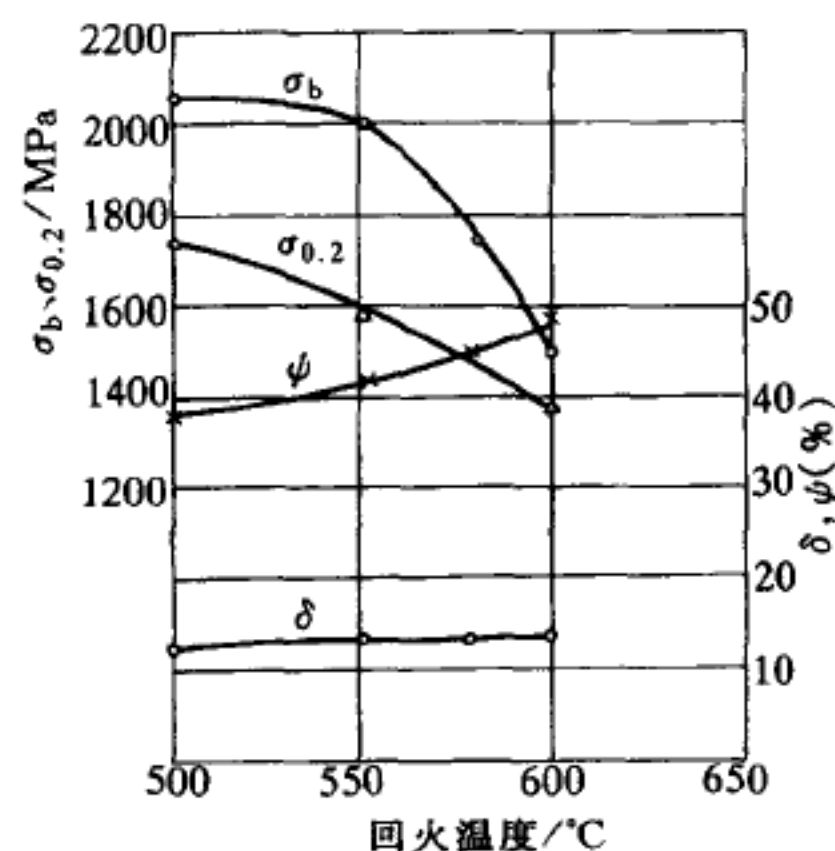
图 16-145 淬火和回火后的畸变率
试样: $\phi 25$ mm, 长 50mm, 1030℃ 淬火
1—长度 2—直径

图 16-146 不同温度回火后的拉伸性能(1000℃空淬)

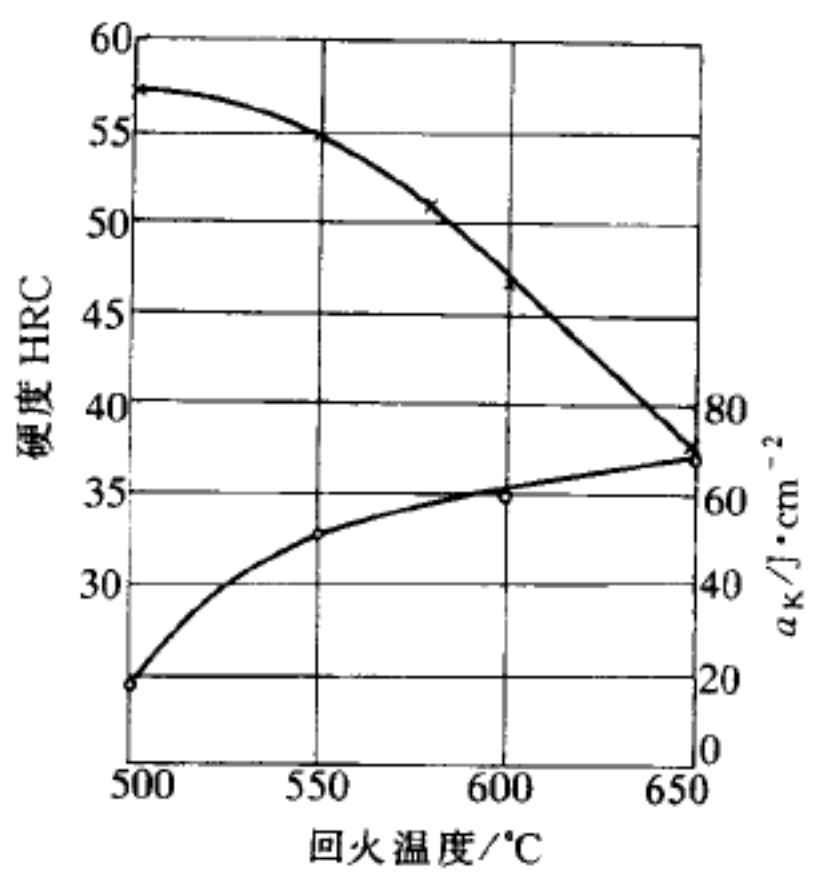


图 16-147 不同温度回火后的冲击韧度和硬度(1000℃油淬)

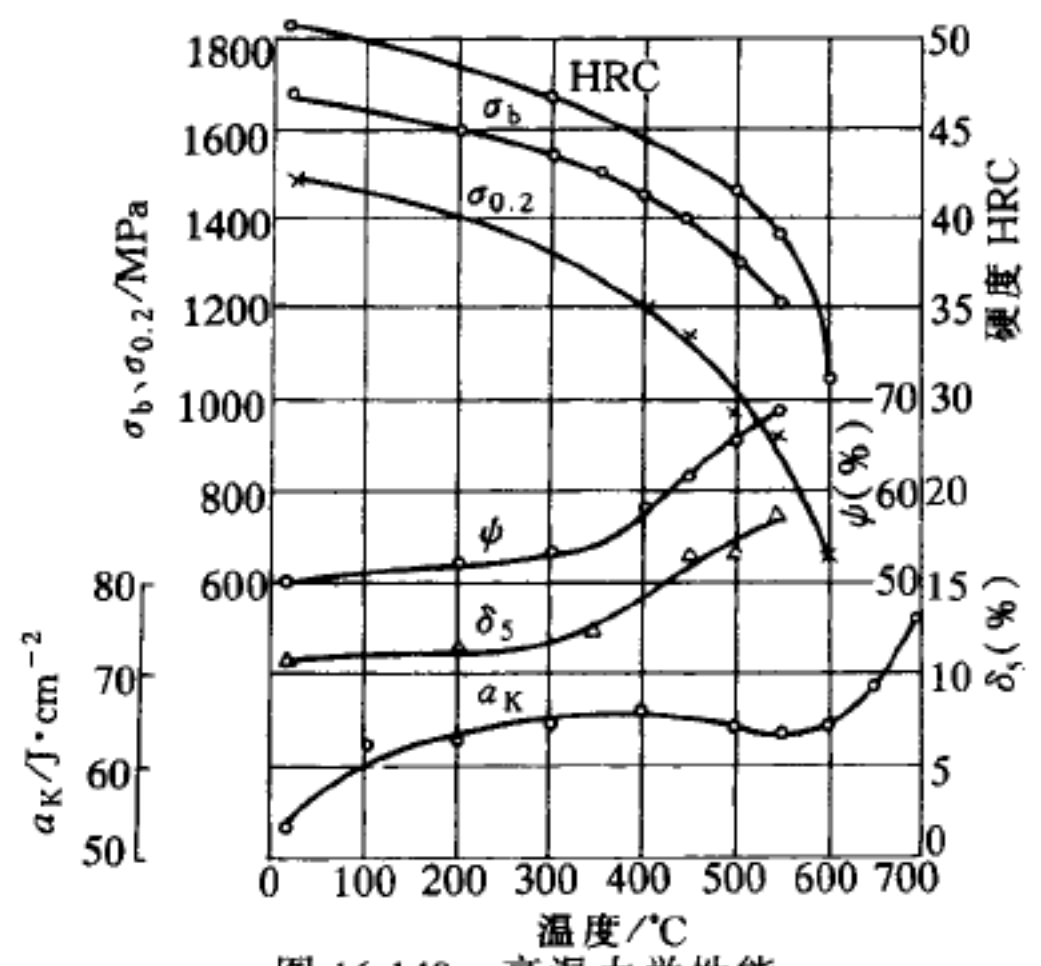


图 16-148 高温力学性能(1000℃空淬,580℃回火)

6) 4Cr5W2VSi(图 16-149 ~ 图 16-153)

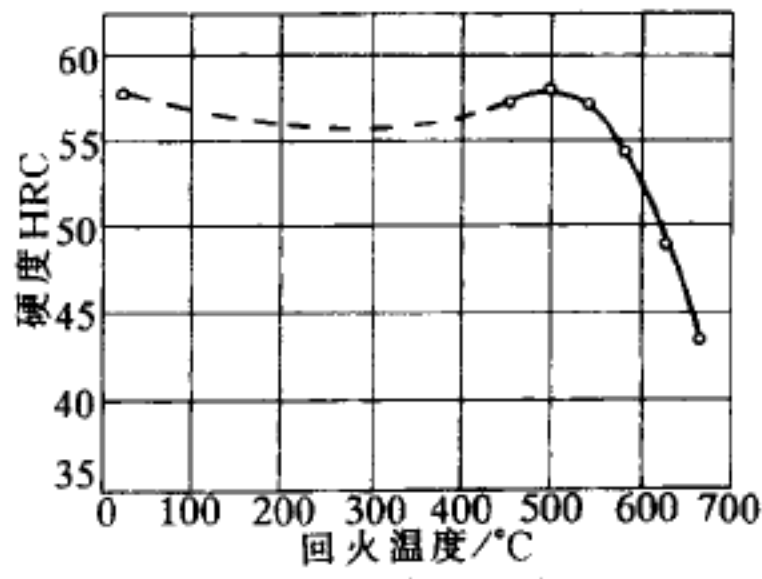


图 16-149 回火硬度与回火温度的关系(1080℃空淬)

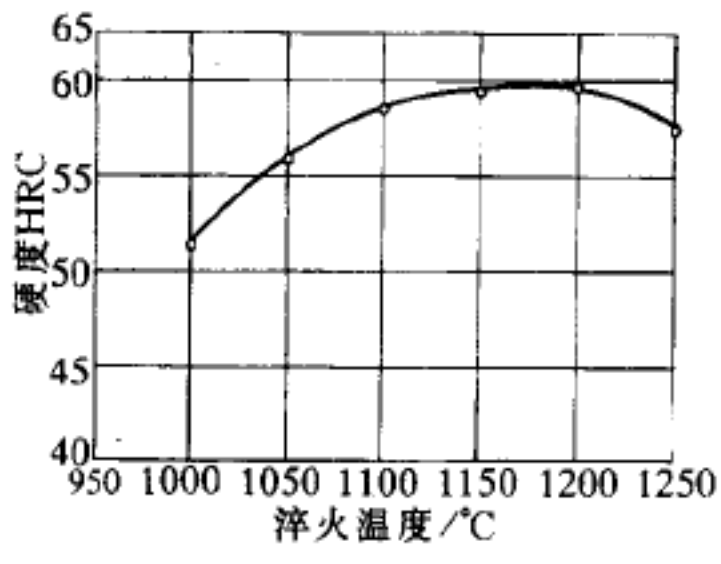


图 16-150 淬火硬度曲线

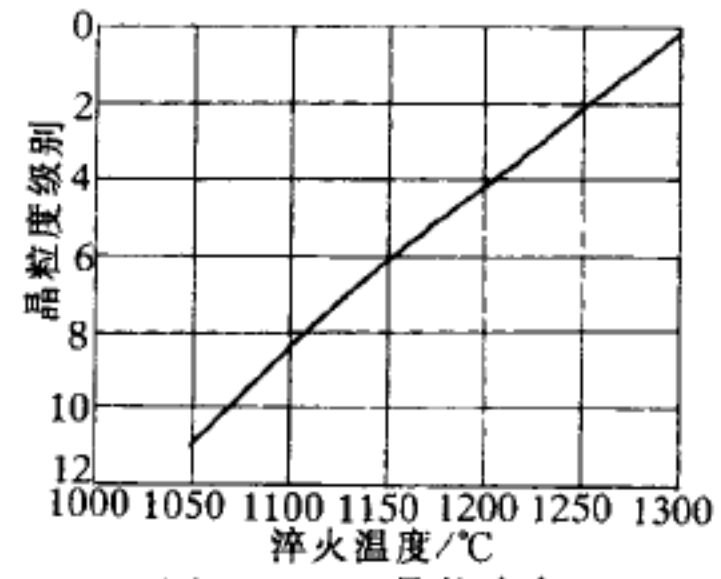


图 16-151 晶粒度与淬火温度的关系

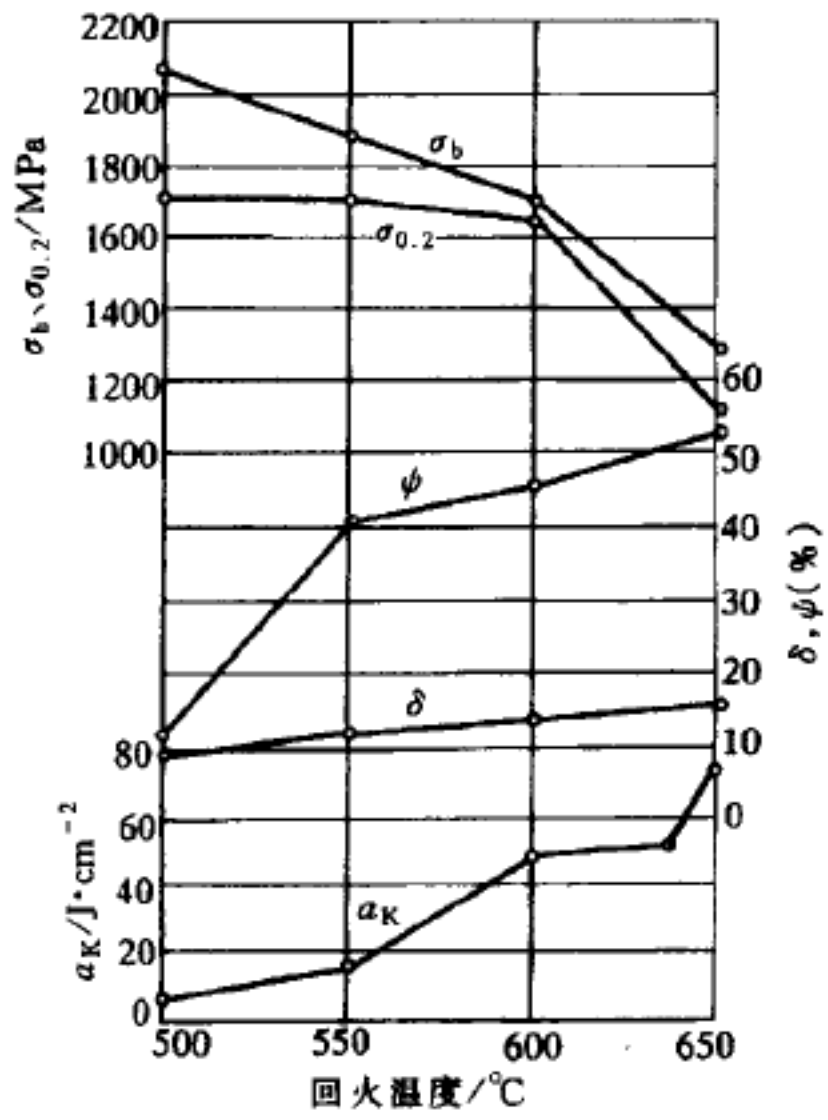


图 16-152 不同温度回火后的室温力学性能(1040℃油淬,回火 2h)

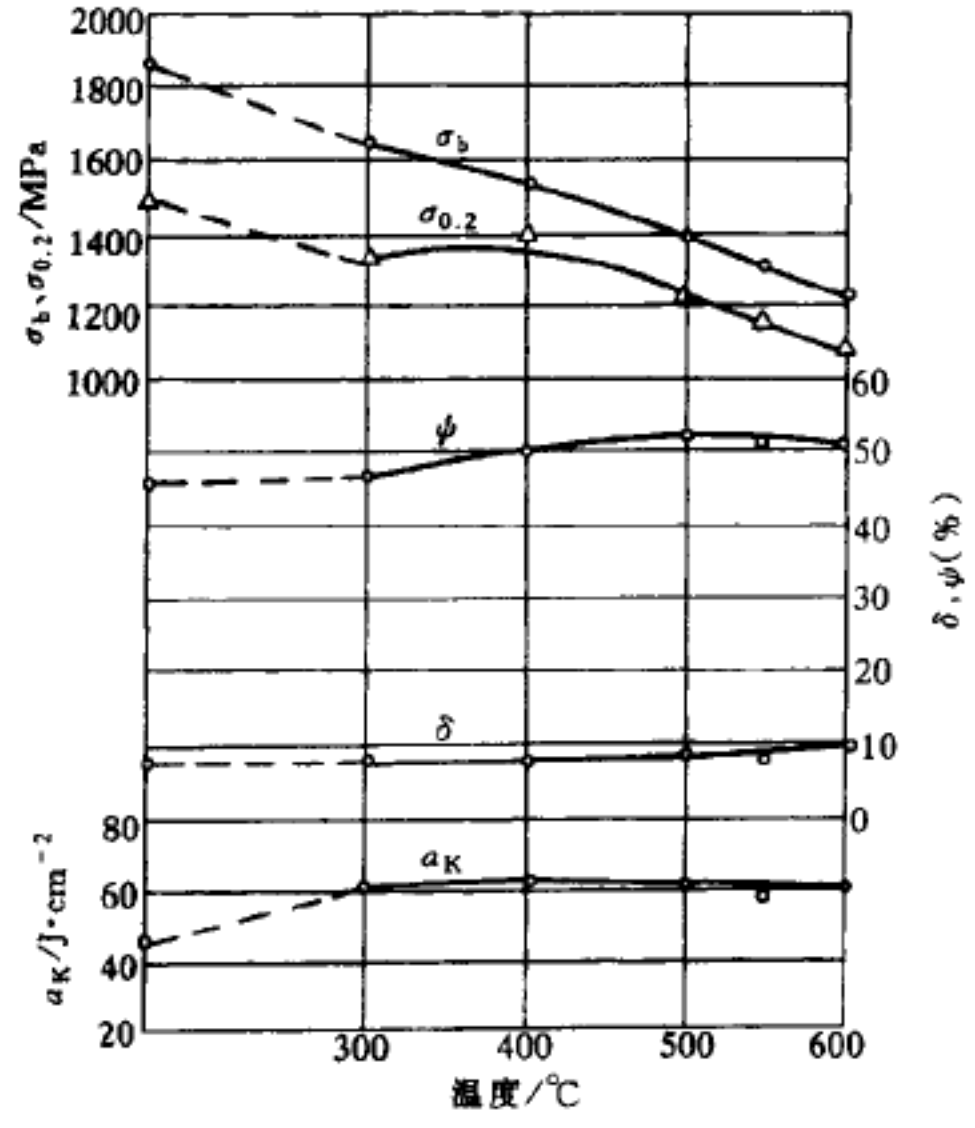


图 16-153 钢的高温力学性能(1040℃油淬,580℃回火 2h)

7) 4Cr5MoSiV1(图 16-154 ~ 图 16-158)

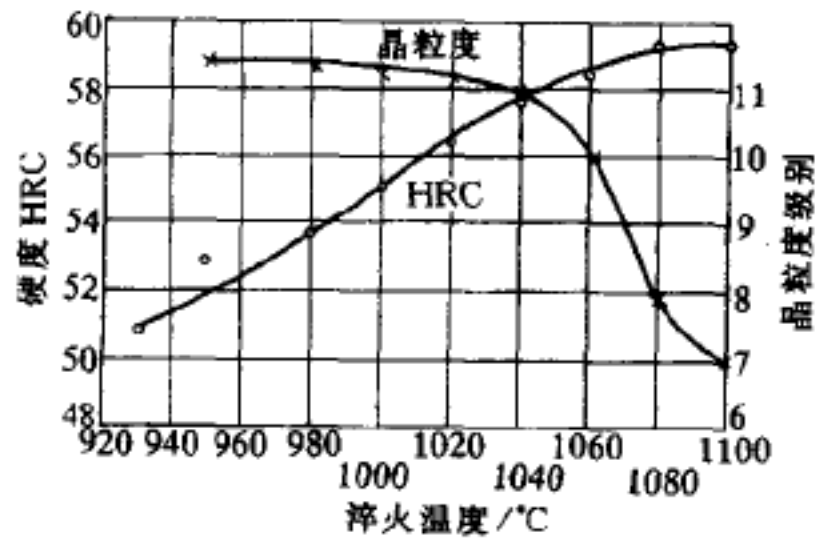


图 16-154 硬度、晶粒度与淬火温度的关系

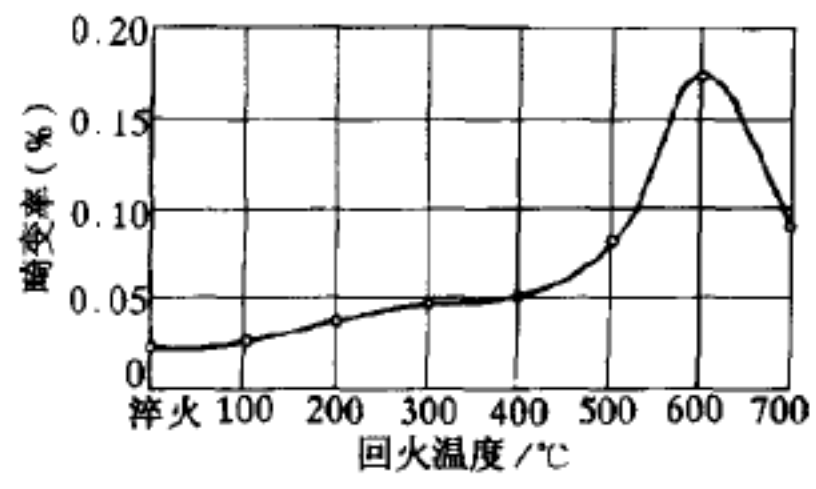


图 16-156 淬火和回火后的畸变率

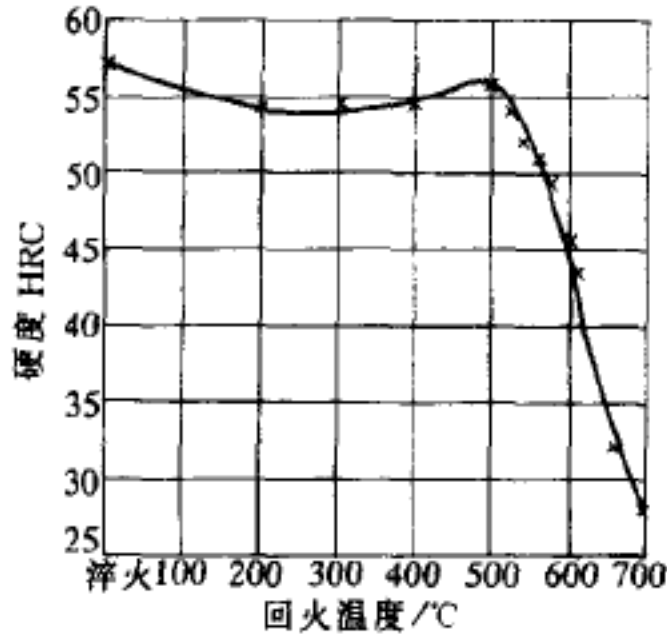


图 16-155 回火硬度曲线(1020℃油淬、两次回火)

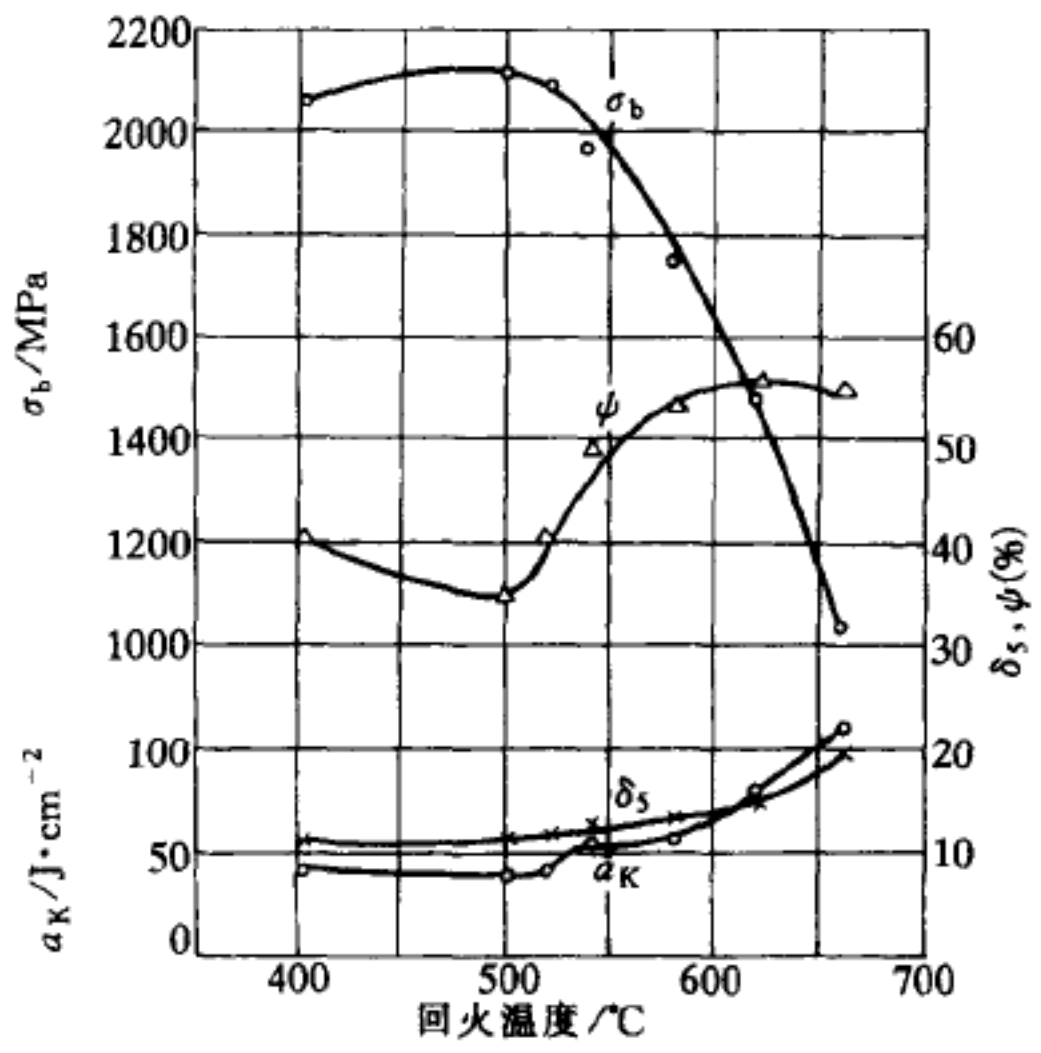


图 16-157 不同温度回火后的室温力学性能(1020℃油淬,两次回火)

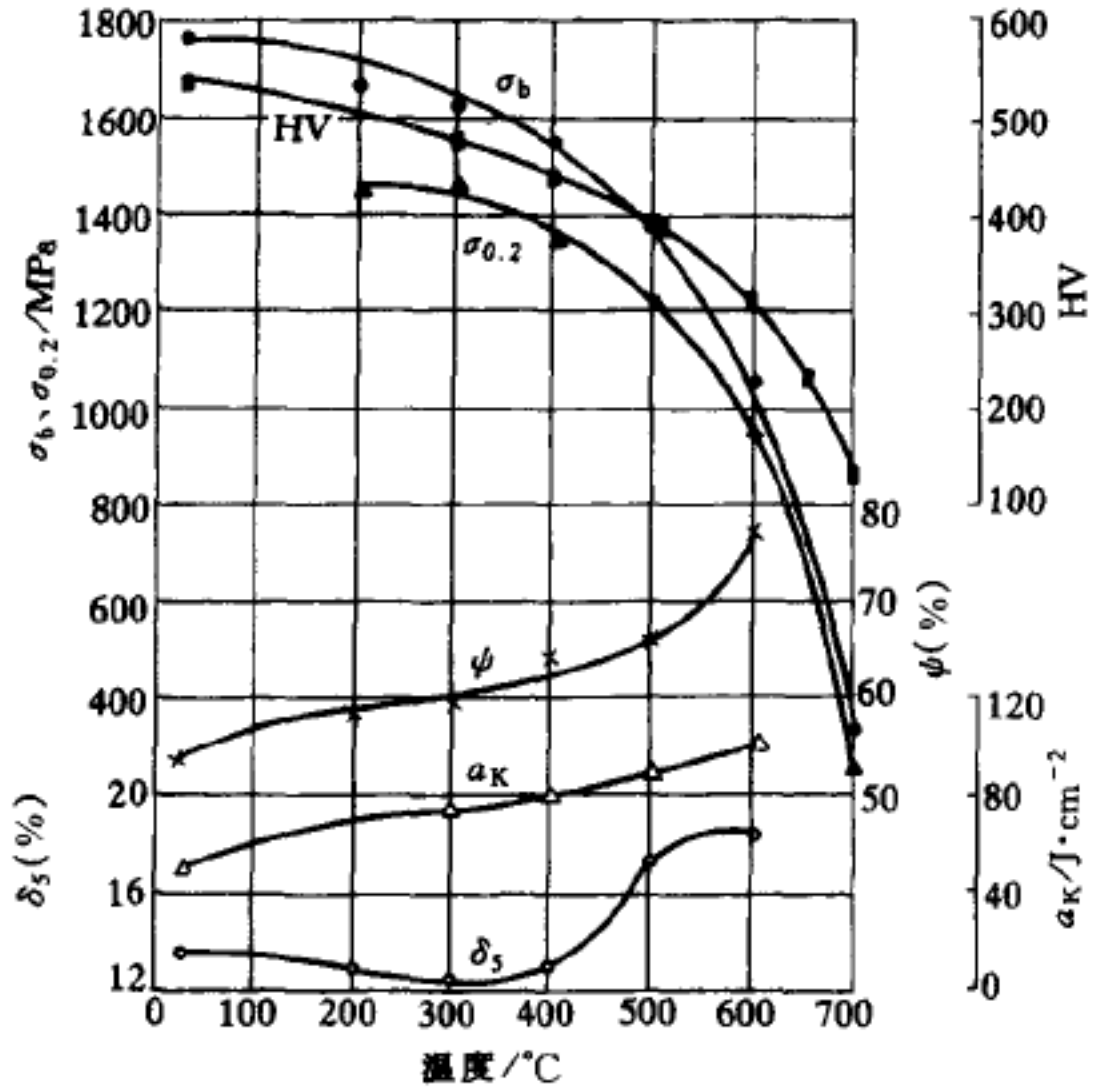


图 16-158 高温力学性能(1020℃油淬,580℃2次回火)

8) 5CrMnSiMoV(图 16-159 ~ 图 16-163)

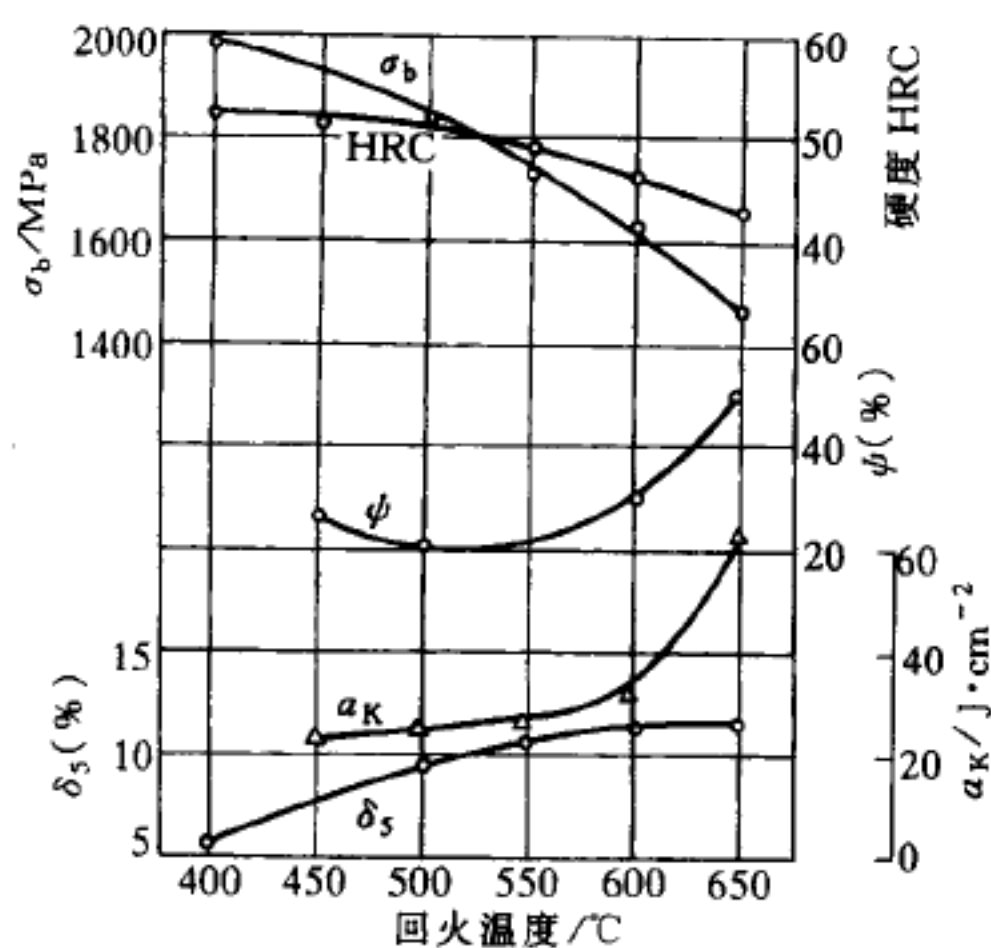


图 16-159 不同温度回火后的室温力学性能(880℃油淬)

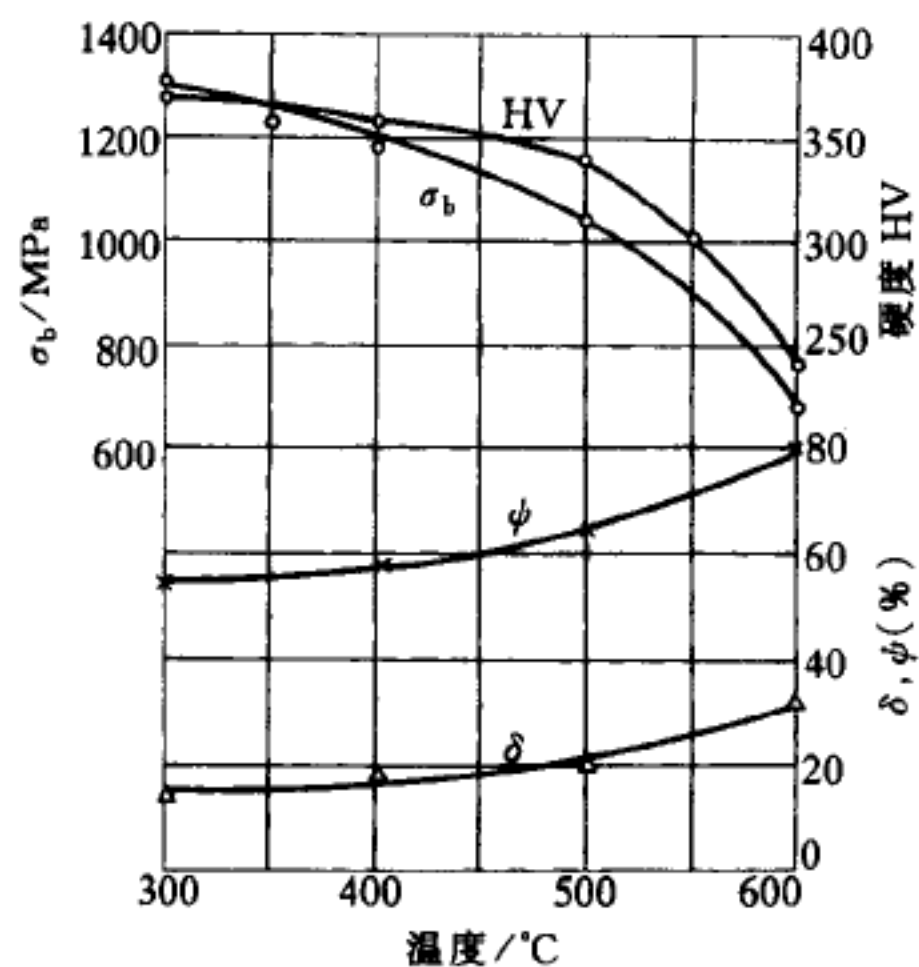


图 16-160 高温硬度和高温拉伸性能(880℃油淬, 550℃回火)

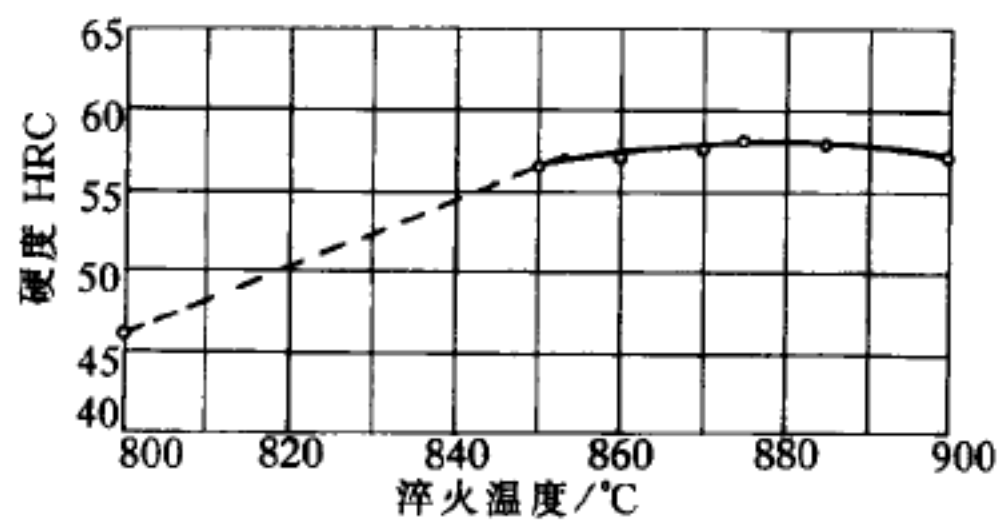


图 16-161 不同温度淬火后的硬度

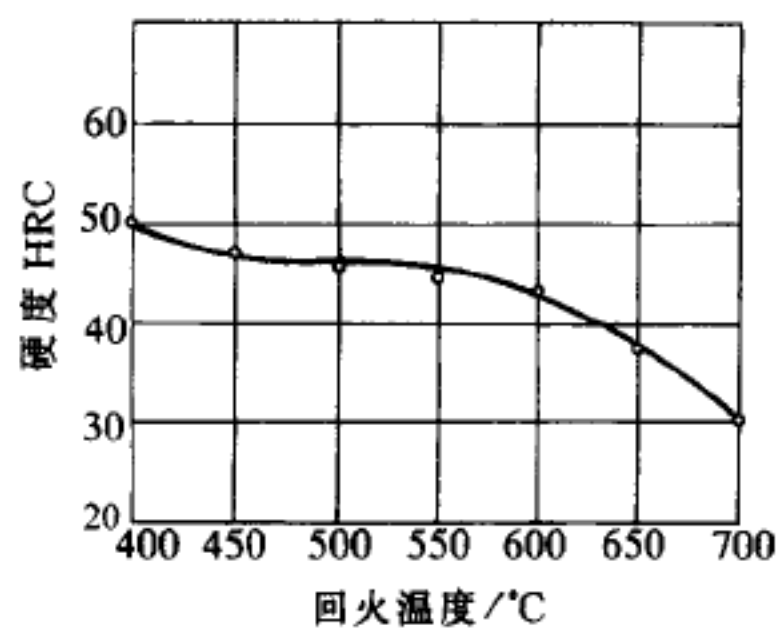


图 16-162 不同温度回火后的硬度(870℃油淬)

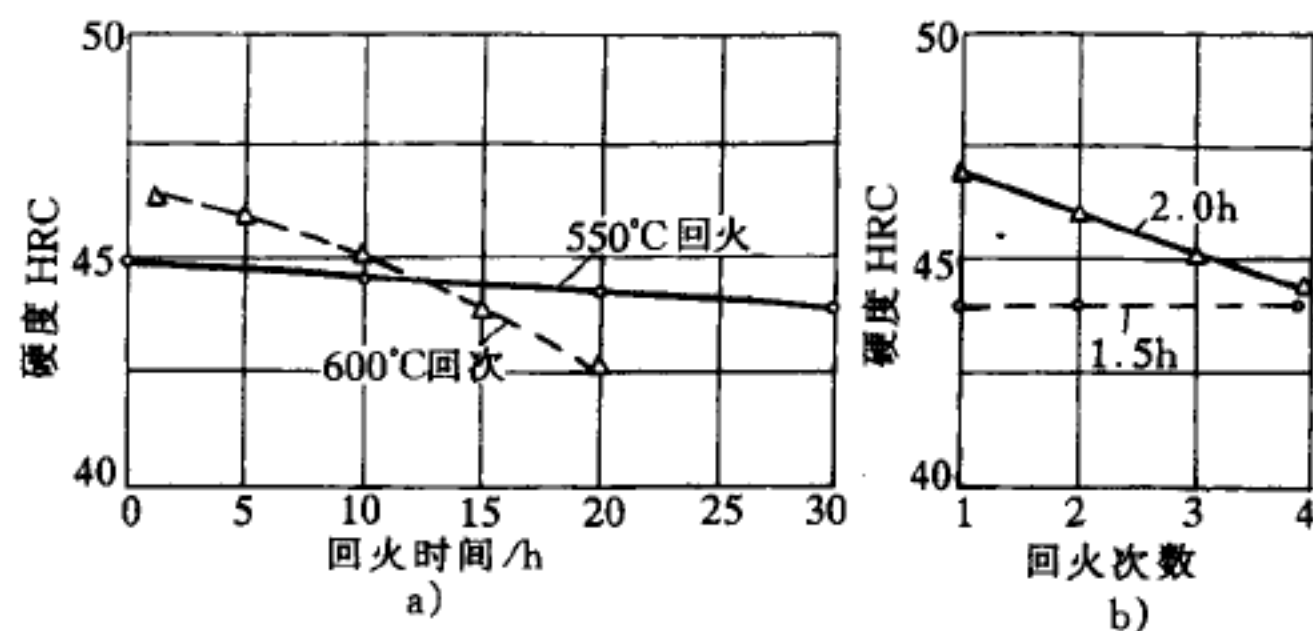


图 16-163 耐回火性(870℃油淬)

3. 成形模具的热处理(表 16-68 ~ 表 16-74)

表 16-68 成形模具用钢

用钢类别	小型模具	大中型模具
冷挤压成形模用钢	20, 20Cr, 12CrNi3A(渗碳) T7A, Cr2	
切削成形模用钢 (直接淬硬用钢)	T7A ~ T12A	9Mn2V, CrWMn, GCr15, 9CrWMn
调质用钢	45, 40Cr	9Mn2V, CrWMn, GCr15, 9CrWMn, 5CrW2Si, 5CrMnMo
高合金渗碳钢		20CrMnTi, 12CrNi3A(渗碳)
易切削模具钢 (预硬钢)	8Cr2MnWMoVS(可渗氮), 作预硬钢时(42 ~ 48HRC, σ_{bb} 2942 ~ 2520MPa, α_K 69J/cm ²)可用于制作精密塑料模, 胶木模等, 也可作薄板精冲模 5NiSCa(可渗氮), 用于制作形状复杂, 精密的注型模, 胶木模、橡胶模和印制电路板凹模	
时效硬化型模具钢	25CrNiMoAl 适于制作畸变率要求在万分之三以下, 镜面要求高或表面要求蚀刻花纹工艺的精密塑料模	
高耐磨模具钢	Cr12MoV 适于制作压制含有矿物填料的模具	
无磁模具用钢	7Mn15Cr2Al3V2WMo	

表 16-69 成形模的硬度要求

模具名称	塑料(胶木)用模		粉末冶金用模		石棉用模		橡胶用模	
	简单	复杂	简单	复杂	简单	复杂	简单	复杂
要求硬度 HRC	48 ~ 53	45 ~ 50	60 ~ 62	60 ~ 62	56 ~ 62	50 ~ 55	30 ~ 35	28 ~ 32

表 16-70 成形模具用钢的退火工艺

钢 号	加 热		等 温		冷 却 方 式	退火后硬度 HBW
	温度/℃	时间/h	温度/℃	时间/h		
10, 20	890 ~ 910	4 ~ 6	—	—	炉冷至 200℃, 出炉空冷	≤ 131
15Cr, 20Cr	860 ~ 880	6 ~ 8	—	—	炉冷至 200℃, 出炉空冷	≤ 140
40, 40Cr	820 ~ 840	> 2	—	—	炉冷至 500℃, 出炉空冷	≤ 163
T7A ~ T12A	760 ~ 780	3 ~ 4	680 ~ 700	5 ~ 6	炉冷至 500℃, 出炉空冷	187 ~ 207
CrWMn	780 ~ 790	2 ~ 4	680 ~ 700	4 ~ 6	炉冷至 300℃, 出炉空冷	207 ~ 255
5NiSCa	760 ~ 780	2	670 ~ 690	6 ~ 8	炉冷至 550℃, 出炉空冷	217 ~ 220
8Cr2MnWMoVS	790 ~ 810	2 ~ 3	690 ~ 710	4	炉冷至 550℃, 出炉空冷	≤ 229
	790 ~ 810	4 ~ 6	—	—		240
25CrNi3MoAl	740 ~ 760	2 ~ 4	680 ~ 700	4 ~ 6	出炉空冷(或水冷)	

表 16-71 45、40Cr 成形模的调质工艺

钢 号	淬 火 加 热				淬火介质	回 火		硬 度 HRC
	箱 式 电 炉		盐 浴 炉			温 度	时 间	
	温度/℃	时间/min·mm ⁻¹	温度/℃	时间/min·mm ⁻¹		/℃	/h	
45	830 ~ 850	0.8 ~ 1.0	820 ~ 840	0.4 ~ 0.5	盐水→油	500 ~ 540	1 ~ 2	24 ~ 28
						540 ~ 580	1 ~ 2	20 ~ 24
						580 ~ 600	1 ~ 2	18 ~ 20
40Cr	850 ~ 870	1.0 ~ 1.2	840 ~ 860	0.5 ~ 0.6	油	470 ~ 500	1 ~ 2	24 ~ 28
						500 ~ 540	1 ~ 2	20 ~ 24
						540 ~ 580	1 ~ 2	18 ~ 20

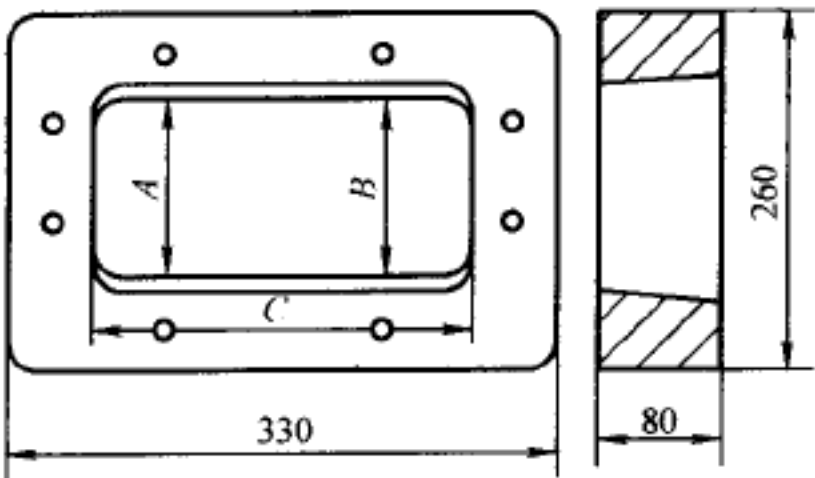
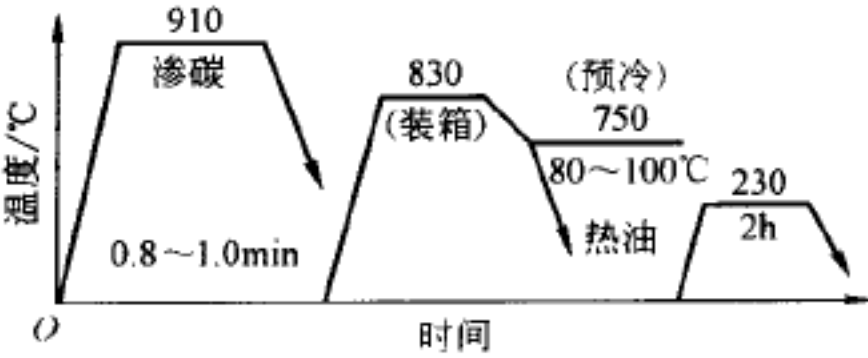
表 16-72 制作塑料用模的钢材淬火工艺

钢 号	预热温度/℃	加热温度/℃	淬 火 介 质
40Cr	盐浴炉加热前,应在 200 ~ 300℃ 烘烤;箱式电炉加热时,可不另行预热	840 ~ 880	碱水
T10A		780 ~ 790 800 ~ 820	水 碱水
Cr2, GCr15		830 ~ 850	油
9Mn2V		780 ~ 800	油
9CrWMn		800 ~ 820	油
CrWMn		800 ~ 820	油
5CrMnMo		830 ~ 850	油
5CrNiMo		840 ~ 860	油
5CrW2Si		870 ~ 900	油
Cr12MoV	850	960 ~ 980	油
25CrNi3MoAl		880 ~ 900(固溶热处理)	硬度为 50HRC
7Mn15Cr2Al3V2WMo	550, 850	1180 ~ 1200(固溶热处理)	水或 w_{NaCl} 10% 水溶液冷却(20 ~ 24HRC)
5NiSCa		860 ~ 920	油
8Cr2MnWMoVS		860 ~ 880	空气(62 ~ 63HRC)

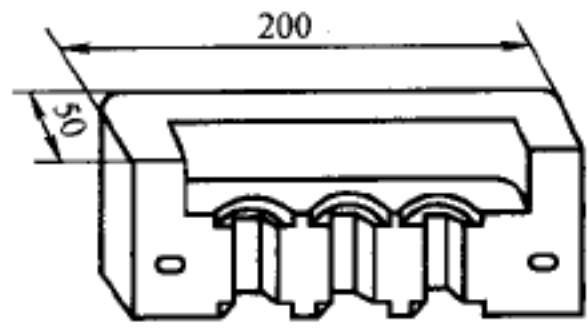
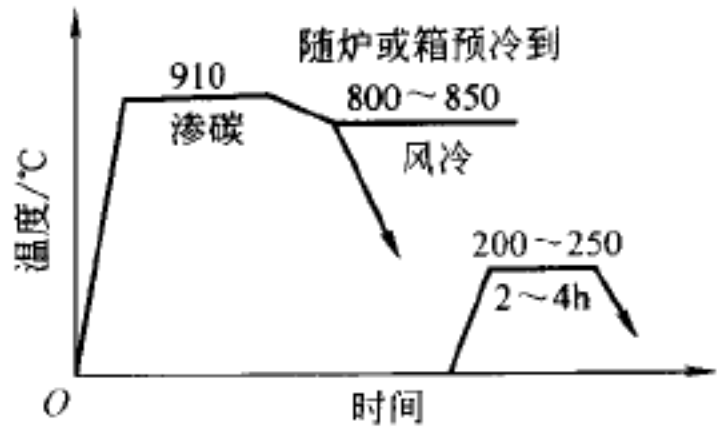
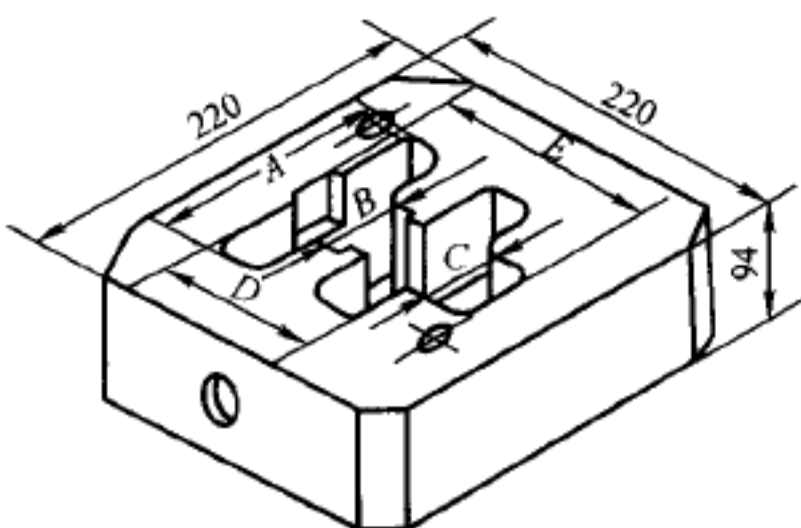
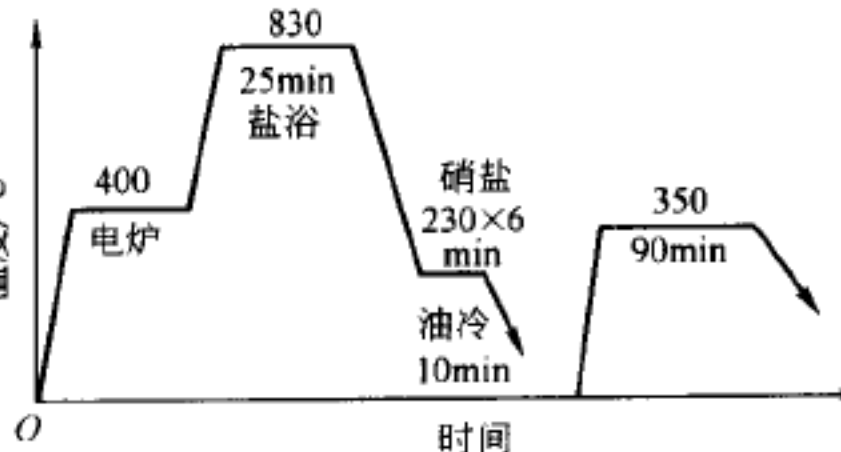
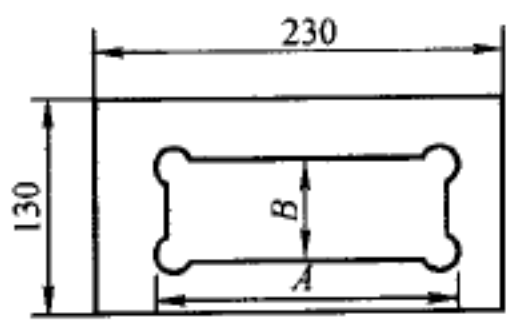
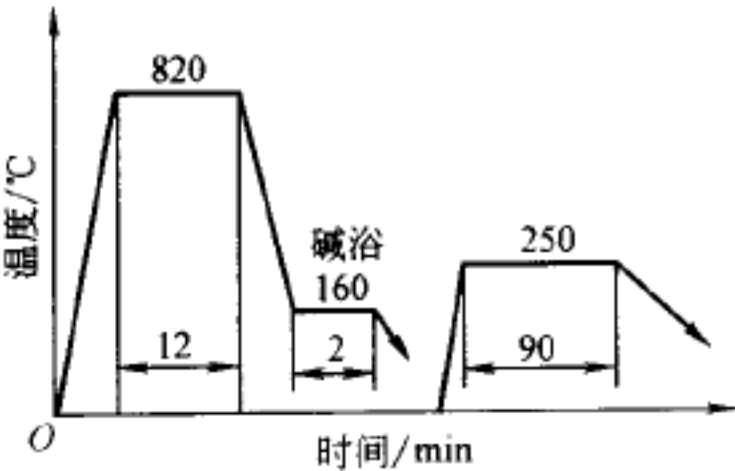
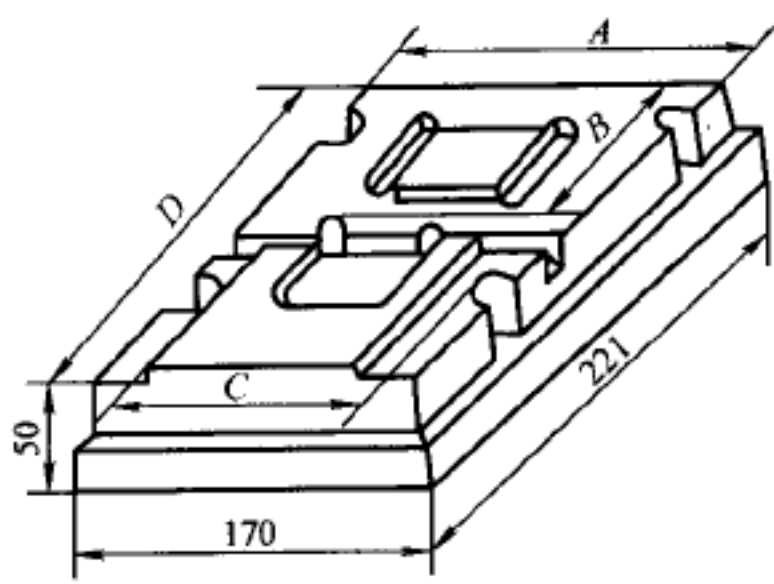
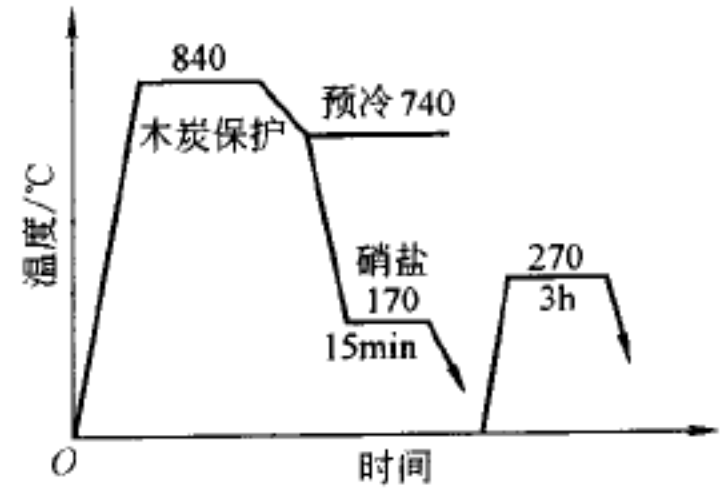
表 16-73 成形模具钢的回火温度与硬度

钢 号	达到下列硬度的回火温度/℃					
	HRC					
	28 ~ 32	30 ~ 35	35 ~ 40	40 ~ 45	45 ~ 50	52 ~ 54
45	470 ~ 500	430 ~ 480	370 ~ 430	310 ~ 370	260 ~ 310	160 ~ 180
40Cr	420 ~ 480	400 ~ 440	340 ~ 400	270 ~ 340	210 ~ 270	160 ~ 180
8Cr2MnWMoVS	作预硬钢时,在 550 ~ 620℃ × 2h 回火 2 次,达到 44 ~ 48HRC					
25CrNi3MoAl	680℃ 时效			520 ~ 540℃ 时效		
7Mn15Cr2Al3V2WMo				650℃ × 15 ~ 20h		

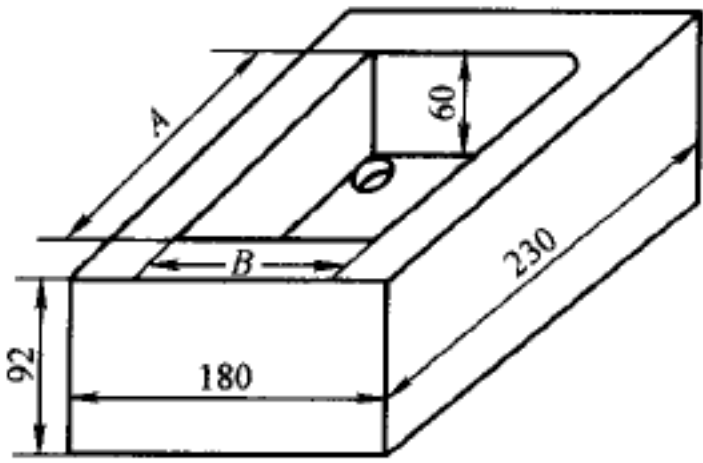
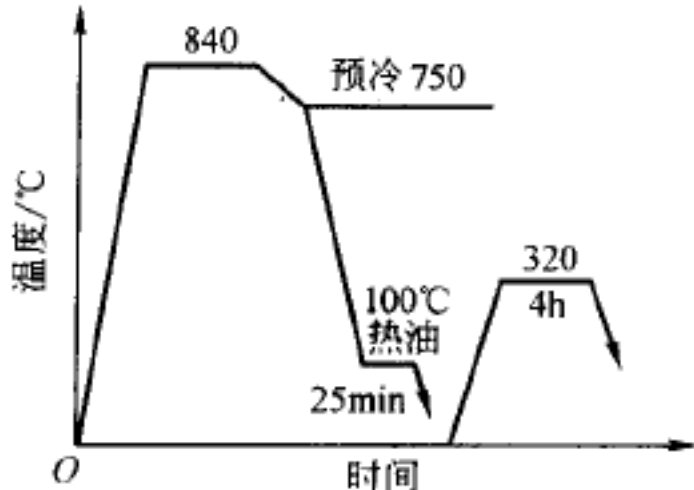
表 16-74 塑料模具热处理工艺举例

模具名称及技术要求	模 具 简 图	工 艺
20Cr 钢制胶木模 硬度:50 ~ 54HRC 畸变:0.1mm		

(续)

模具名称及 技术要求	模 具 简 图	工 艺
12CrNi3A 钢制胶木模 硬度: 53 ~ 56HRC 合面间隙小于 0.05mm		
CrWMn 钢制胶木模 硬度: 51 ~ 55HRC 畸变: A 处 0.07mm B 处 0		
T10A 钢制塑料模 硬度: 52 ~ 56HRC 畸变: - 0.05mm		
5CrMnMo 钢制塑料 压模 硬度: 50 ~ 52HRC 畸变: A 处 + 0.08mm D 处 0.04mm C 处 0.06mm		

(续)

模具名称及技术要求	模 具 简 图	工 艺
5CrMnMo 钢制塑料凹模 硬度: 50 ~ 53HRC 畸变: A 处 - 0.06mm B 处 - 0.04mm		

4. 模具热处理缺陷及防止措施(表 16-75 ~ 表 16-79, 图 16-164 ~ 图 16-166)

表 16-75 模具热处理中常见的缺陷、产生的原因及防止措施

缺陷类型	产 生 原 因	防 止 措 施
球化组织粗大不均, 球化不完善, 组织中有网状、带状和链状碳化物	1. 锻造工艺不佳, 如锻造加热温度过高, 变形量小, 停锻温度高, 锻后冷速缓慢等, 使锻造组织粗大, 并有网、带及链状碳化物存在, 球化退火时难以消除 2. 球化退火工艺不佳, 如退火加热温度过高或过低, 等温温度高或等温时间短等, 可造成退火组织不均或球化不完善	1. 改进锻造工艺或采用正火预备热处理, 消除网状和链状碳化物及碳化物不均匀性 2. 采用双重热处理, 快速均匀球化退火工艺 3. 正确制订球化退火工艺规范 4. 合理装炉保证炉料温度的均匀性 5. 采用以调质处理代球化退火
淬火过热或过烧, 淬火组织粗大化	1. 球化组织不良 2. 淬火加热温度过高, 或高温保持时间过长 3. 工件放置位置不当, 在靠近电极或加热元件区产生过热 4. 对截面变化较大的模具, 淬火工艺参数选择不当, 在薄截面和尖角处产生过热	1. 正确制订淬火工艺, 严格控制淬火温度和加热时间 2. 定期检测和校正测温仪表, 保证仪表的正常运行 3. 工件与电极或加热元件间应保持足够的距离
硬度低或不均	1. 原始组织中碳化物偏析严重, 或球化组织粗大不均 2. 模具表面残留有退火脱碳层或淬火加热时产生脱碳 3. 工件截面大, 淬透性差 4. 淬火温度过高, 残留奥氏体量多, 或淬火温度过低, 加热时间不足, 相变不完全 5. 淬火冷却速度慢, 分级、等温温度过高或时间过长, 冷却剂选用不当 6. 碱浴水分过少或淬火油老化 7. 工件出淬火介质时, 温度过高, 冷却不足 8. 高速钢回火不充分 9. 回火温度过高	1. 保证有良好的预备热处理组织 2. 彻底消除模具表面的氧化皮 3. 进行良好的盐浴脱氧 4. 选用淬透性高的钢 5. 正确制订淬火、回火工艺参数 6. 采用真空加热淬火, 保护气氛加热淬火 7. 严格控制碱浴水分含量 8. 正确选用淬火介质和冷却方式 9. 回火要充分 10. 采用冷处理 11. 进行表面强化处理

(续)

缺陷类型	产生原因	防止措施
脱碳	1. 盐浴老化,脱氧不良 2. 工、夹具向盐浴中带进铁锈 3. 在箱式炉中加热时,保护不良	1. 盐的质量必须符合标准的要求,并经 $300 \sim 500^{\circ}\text{C} \times 2 \sim 4\text{h}$ 的烘干脱水 2. 盐浴定期脱氧,严格控制盐浴中氧化物含量: $\text{BaO(或 Na}_2\text{O)} \leq 0.2\% \sim 0.5\%$, $\text{FeO} \leq 0.3\%$
裂纹	1. 钢中存在有严重的网状、带状、链状碳化物或显微裂纹 2. 钢中存在有大的机加工或冷塑性变形应力 3. 热处理操作不当(加热或冷却速度过快,淬火介质选择不当,冷却温度过低) 4. 淬火加热时过热、过烧 5. 模具形状复杂,厚薄不均,热应力和组织应力过大 6. 返修淬火加热时,未经中间退火处理 7. 回火不及时或回火不足 8. 磨削工艺不当 9. 电火花加工层存在有大的拉应力和大量的显微裂纹	1. 改进锻造和球化退火工艺,消除网状、带状、链状碳化物,改善球化组织的均匀性 2. 进行淬火前的去应力退火($>600^{\circ}\text{C}$) 3. 严格控制淬火加热温度和时间,防止过热过烧 4. 采取预热和预冷措施 5. 淬火后即时回火,回火要充分
腐蚀	1. 盐浴中碳酸盐或硫酸盐的含量过高 2. 在 $400 \sim 500^{\circ}\text{C}$ 的硝酸盐中在按分级冷却时,所产生的氧化腐蚀 3. 模具和夹具向盐浴中带进氧化物	1. 控制盐浴中碳酸盐含量,不用黄血盐作高温盐浴脱氧剂,加活性炭除硫酸盐 2. 避免向盐浴中带入氧化物 3. 用硝酸盐作分级冷却介质(不宜用氯化钙) 4. 模具淬火、回火后及时清除表面残盐

表 16-76 模具允许的畸变量

模具种类	工作部位名义尺寸 (或模体高度)/mm	允许畸变量/mm		
		碳素工具钢	低合金钢	高合金工具钢
冷作模具	≤ 50	-0.05	± 0.03	± 0.02
	51 ~ 120	-0.10	± 0.06	+0.02 -0.04
	121 ~ 200	-0.15	+0.05 -0.15	+0.03 -0.06
	201 ~ 300	-0.20	+0.05 -0.15	+0.04 -0.08
	≤ 100	± 0.10	± 0.06	± 0.04
	101 ~ 250	+0.15 -0.20	+0.10 -0.15	+0.10 -0.08
	251 ~ 400	+0.20 -0.30	+0.15 -0.20	+0.15 -0.18
模具各孔中心距变形率		$\pm 0.08\%$	$\pm 0.06\%$	$\pm 0.04\%$
	≤ 275		± 0.20	
	276 ~ 375		± 0.30	
	≥ 375		± 0.50	

项目	轴类	立方体	圆盘形	圆环形	开口形	长槽形	长方形
原始状态							
热应力对畸变作用							
相变应力对畸变作用							
各向异性对畸变作用							

图 16-164 热处理畸变的基本特征

表 16-77 模具钢基本特性对热处理畸变倾向的影响

钢的特性	特性的变化	对畸变倾向的影响
M_s 点	高	马氏体转变量多,组织应力占主导,使型腔趋胀
	低	残留奥氏体多,热应力占主导,型腔趋缩
淬透性	高	可采用缓和的淬火介质,有利于减少翘曲与畸变
	低	须用强烈的淬火介质,但畸变大,且难控制
碳化物均匀性	优	各向畸变均匀,可减少翘曲程度
	劣	通常畸变大,加重翘曲及各向胀缩
相成分的影响	马氏体量增多	增加体积膨胀量,增大组织应力,不利于减小畸变
	残留奥氏体量增多	能补偿马氏体的体积膨胀,有利于减小畸变或实现微畸变
	贝氏体量增多	有利于减小畸变
	碳化物量增多	对体积变化无影响
回火转变	残留奥氏体分解成马氏体	使体积膨胀
塑性变形抗力	强韧性高	有利于减小热应力引起的畸变
	马氏体转变区强度高	有利于减小组织应力引起的畸变

(续)

钢的特性	特性的变化	对畸变倾向的影响
锻造纤维方向	垂直于型孔	型孔趋于缩小
	平行于型孔	型孔趋于胀大

表 16-78 工艺因素对冷作模具型腔畸变趋势的影响

工艺因素		中碳钢 (45、50)	碳素工具钢 (T10A)	低合金工具钢 (CrWMn, 9Mn2V)	高合金工具钢 (Cr12, Cr12MoV)
常规淬火		显著趋胀	显著趋胀	趋胀为主	趋 缩
淬火温度		上限时多胀	上限时剧缩	上限时多胀	上限时剧缩
		下限时少胀	下限时少缩	下限时少胀	下限时少缩
淬火 介质	盐水	胀	缩	—	—
	油	缩	缩	①	①
	碱浴	胀	②	胀	—
	硝盐	胀	胀	②	—
深冷处理		—	—	趋 胀	明显趋胀
回火影响		收 缩	显著收缩	200~300℃回火区趋胀, 其他区回火趋缩	<450℃趋缩 500~550℃趋胀
流线的影响		—	—	—	纵向趋胀 横向趋缩
工件形状		厚壁少缩	薄壁趋胀 厚壁趋缩	薄壁趋胀 厚壁趋缩	薄壁趋胀 厚壁趋缩

① 合金工具钢用热油作淬火介质时, 会增大模具型孔胀大的趋向, 用冷油时, 则型孔收缩的趋向。

② 碳素工具钢、合金钢淬碱浴或硝盐时, 碱浴或硝盐中水分多, 碱浴或硝盐的使用温度低, 在碱浴或硝盐中停留时间短, 都易使型孔趋向于胀大。

表 16-79 几种常用冷作模具钢的淬火畸变

钢 号	试样尺寸/mm	淬火工艺	ϕ 残留奥氏体 (%)	体积变化率 (%)	平均尺寸变化率 (%)
T10	$\phi 9.5 \times 28.6$	785℃ 淬盐水	≈ 9 心部为托氏体	+0.94	+0.3
	$\phi 28.6 \times 76.2$			+0.47	0.15
	$\phi 12.7 \times 76.2$			+0.24	0.08
9CrWMn	12.7 × 12.7 × 25.4	800℃ 淬油	≈ 10	+0.63	+0.21
60Si2Mn	12.7 × 12.7 × 25.4	885℃ 淬油	—	+0.55	+0.18
Cr12MoV	12.7 × 12.7 × 25.4	1010℃ 油淬	≈ 25	-0.07	-0.03

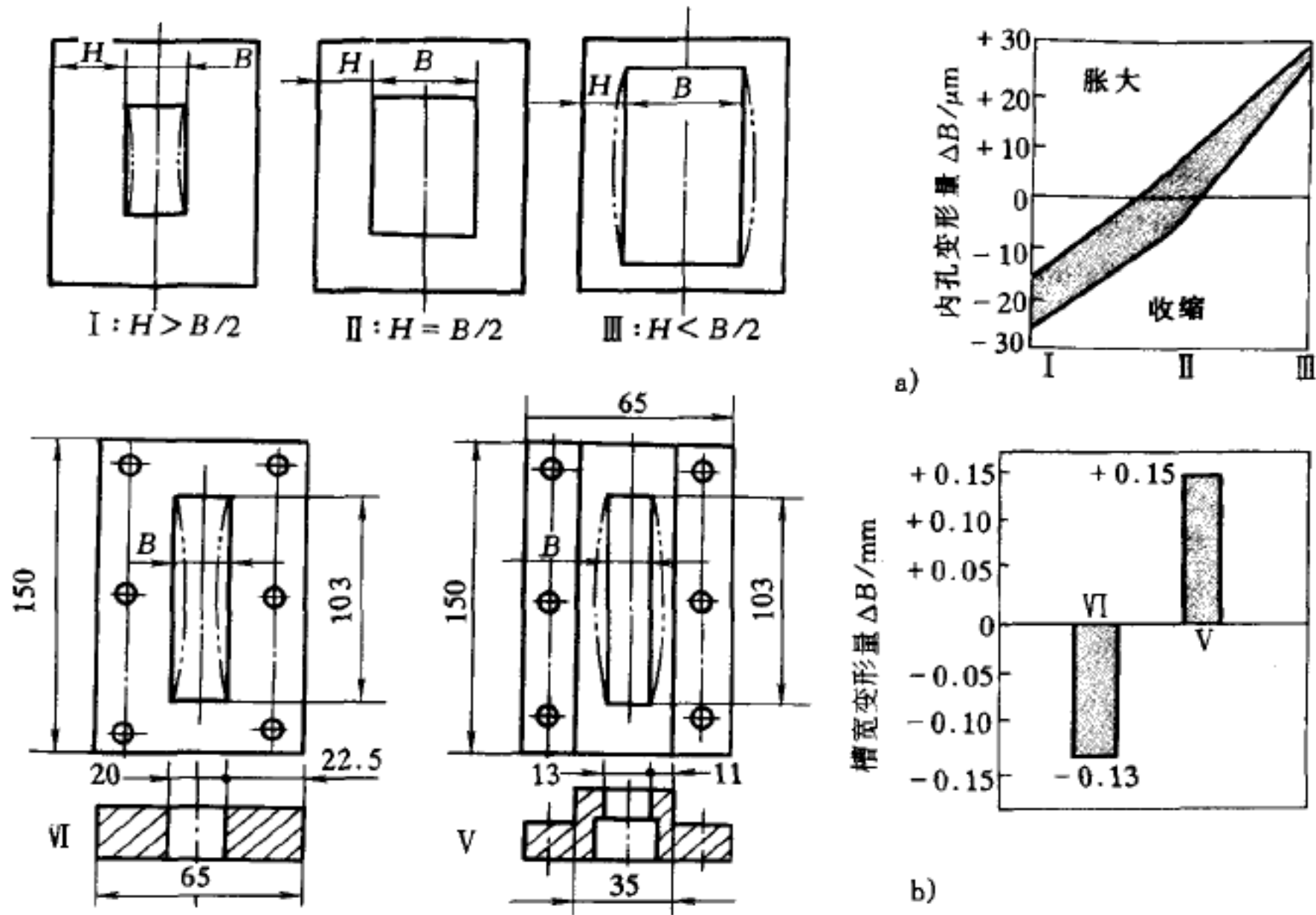


图 16-165 凹模壁厚对型腔淬火畸变的影响

a) 不同壁厚比的 Ti0A、CrWMn 钢试样 b) Ti0A 钢不同壁厚凹模

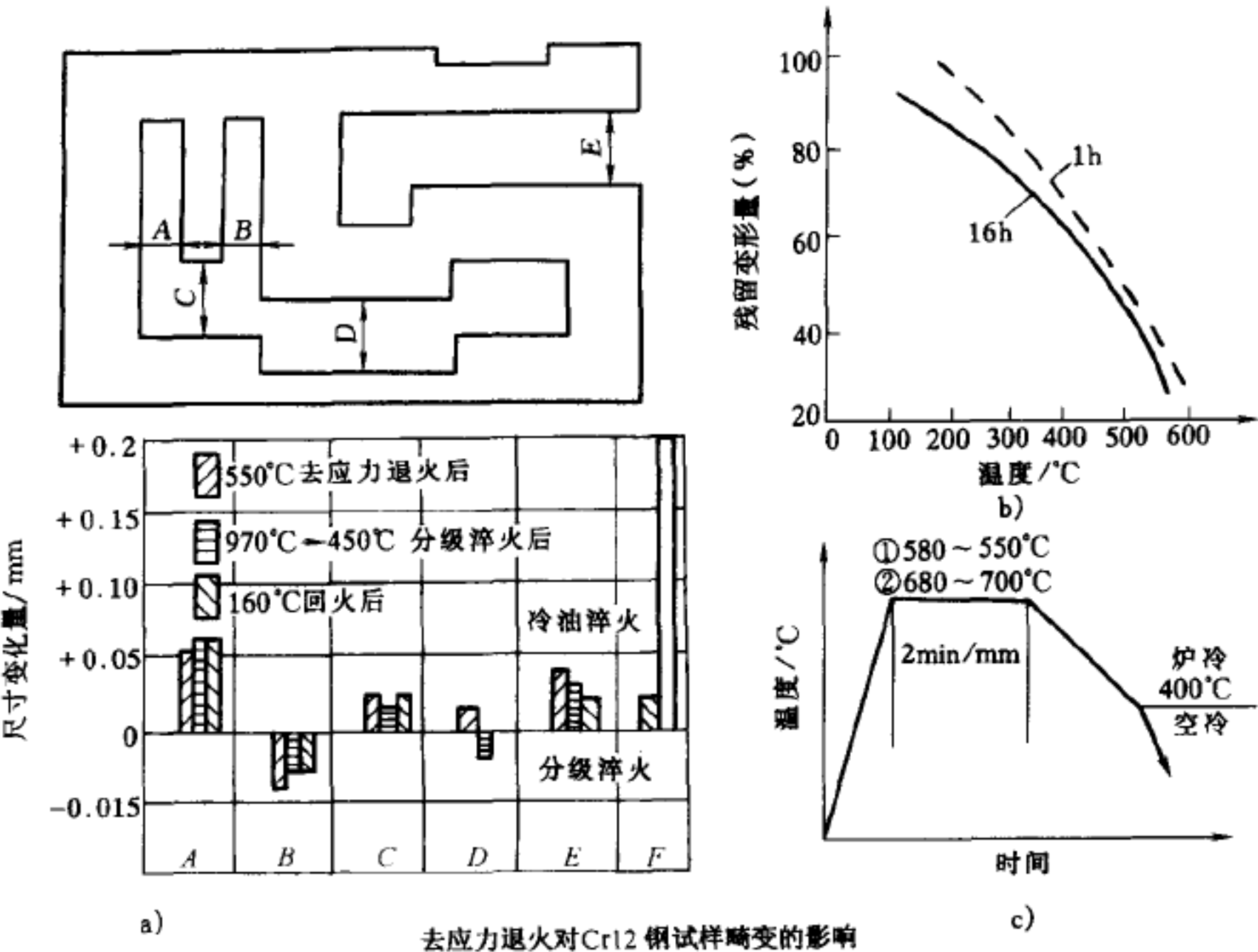


图 16-166 工具钢冷加工后的去应力退火对减少淬火畸变的作用

a) 去应力退火及淬火介质对 Cr12 钢试样畸变的影响 b) 去应力退火对残留畸变的影响 c) 去应力退火工艺曲线

5. 高强韧模具材料及模具的强韧化热处理(表 16-80 ~ 表 16-84)

表 16-80 高强韧模具材料的应用及效果示例

钢 号	热 处 理 工 艺	模 具	应用效果/次	备 注
3Cr3Mo3W2V (HM1)	550℃第一次预热,800℃第二次预热,1030~1060℃加热油淬,600~620℃回火3次,硬度为44~48HRC	轴承套圈热挤压凸凹模	1~3万	
	550℃第一次预热,800℃第二次预热,1110~1130℃加热油淬,640~660℃回火3次,硬度为38~42HRC	高强度钢形状复杂锻件精锻模	≈1000	
3Cr3Mo3VNb (HM3)	550℃第一次预热,800℃第二次预热,1040~1060℃加热油淬,560~640℃回火,硬度为48~42HRC	易脆裂的轴承套圈热挤压模	1~3万	该钢属超高强韧热模具钢,在600℃以上强韧性超过常用高强韧热模具钢
		连杆辊锻模	1~2万	
		压铸铝合金模具	15~20万	
	550℃第一次预热,800℃第二次预热,1040~1060℃加热油淬,560~600℃回火二次,硬度为48~46HRC	耐热不锈钢制弯管头、支板销、叶片锻件等热模具		
5Cr4W5Mo2V (RM2)	500℃第一次预热,800℃第二次预热,1120~1140℃加热油淬,610~630℃回火2次,硬度为50~52HRC	轴承套圈热锻冲模	1~2万	
5Cr4Mo3SiMnVA1 (012A1)	550℃第一次预热,800℃第二次预热,1090~1110℃加热油淬,520~540℃×120min回火3次,硬度为60~62HRC	M12六角螺母下冲	11万	该钢系基体钢
6Cr4W3Mo2VNb (65Nb)	550℃第一次预热,800℃第二次预热,1150~1170℃加热油淬,540~570℃回火3次,硬度为58~60HRC	M10螺栓冷锻顶模	16~20万	该钢系基体钢
		平圆头十字槽冲模	9万	
		不锈钢异形件冷锻模	2~2.5万	
Cr4W2MoV	550℃第一次预热,880℃第二次预热,980~1000℃加热油淬,400~420℃回火2次,硬度为56~58HRC	钢板弹簧冲孔凸模	≈800	
8Cr2MnWMoVS	在预硬态使用: 860~880℃加热空冷,硬度为60~64HRC, 560~620℃回火硬度为36~44HRC,560℃离子渗氮480min,硬度为1000~1100HV _{0.1}	胶木模, 陶土模		
	在高硬态使用550℃第一次预热,800℃第二次预热,860~900℃空淬,160~250℃回火,硬度为58~60HRC	电阻连接复合模	60~150万	
		倒顺开关级进模		
7Cr7Mo3V2Si (LD)	550℃第一次预热,800℃第二次预热,1090~1100℃加热油淬,520~540℃回火2次硬度为58~60HRC	M10六角螺母下冲	18万	

(续)

钢 号	热 处 理 工 艺	模 具	应用效果/次	备 注
7Cr7Mo3V2Si (LD)	550℃第一次预热,800℃第二次预热,1090~1100℃加热油淬,520~540℃回火2次,硬度为58~60HRC	M12六角螺栓冷锻模	40万	
		3/4in轴承钢球冷锻模	3.5~4万	

注:模具的热处理工艺及使用硬度要按模具的尺寸大小、形状复杂程度及工作条件选定。

表 16-81 模具强韧化处理应用效果举例

模具名称	模具材料	强韧化工艺及方法	应用效果及使用寿命/次
枪管座锻模	3Cr2W8V	高温淬火,高温回火: 1130~1150℃油淬,640~660℃回火,硬度38~42HRC	0.8~1.0
一字槽光冲模	60Si2MnA	贝氏体等温淬火 850~870℃加热,230~240℃×25min等温后空冷,280~300℃回火,硬度为56~58HRC	2~3万
六角螺母冷锻下冲模			10~15万
分电器螺塞螺纹滚螺纹模	Cr12MoV	贝氏体等温淬火: 980~1000℃加热,270~280℃×240min等温后空冷,400~420℃回火,硬度为54~56HRC	5~8万
硅钢片冲孔冲模 ($\phi 10\text{mm}$)		1030~1050℃空冷淬火到室温,再在-70℃冷处理60min,取出后温度回升到室温后进行180~200℃的回火	刃磨寿命12万(未冷处理的为5万次)
不锈钢餐具中温热轧模具	5Cr4W5Mo2V	中温回火 1130~1140℃加热油淬,440~450℃回火,硬度为54~58HRC	15~25万
微细冷冲模	CrWMn	贝氏体等温淬火: 820~840℃加热,在230~240℃等温后空冷,230~250℃回火,硬度为54~56HRC	8~10万
表壳热冲模	W18Cr4V	1210~1230℃加热油淬,600~610℃回火2次,硬度为58~60HRC	2.5~4.0万
滚花轮			0.8~1万
螺钉冷锻模	W6Mo5Cr4V2	1170~1180℃加热油淬,200~220℃回火,硬度为60~62HRC	10~15万

表 16-82 模具的表面强化及应用效果示例

模具名称	模具材料	表 面 强 化 工 艺	应用效果/次
磁性材料粉末压制模	Cr12MoV	粉末渗硼 渗剂:SiC93%,+KBF ₄ 5%+B ₄ C2% 工艺:900~920℃×4h渗硼,油冷,200℃回火	6个月
钢管冷拔模	45	盐浴渗硼 渗剂:Na ₂ B ₄ O ₇ 80%~85%+NaF10%+Al屑5%~10% 工艺:920~950℃×3~5h渗硼淬火,160~180℃×1.5~2h回火	寿命高于渗碳淬火模具

(续)

模具名称	模具材料	表面强化工艺	应用效果/次
拉深模	4Cr	盐浴渗硼 渗剂: $\text{NaCl}6\% + \text{Na}_2\text{CO}_3 12\% + \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 7\% + \text{SiCl}12\%$ 工艺: $930 \sim 950^\circ\text{C} \times 3 \sim 4\text{h}$ 渗硼, 850°C 预冷, 油淬, $200^\circ\text{C} \times 4\text{h}$ 回火	≈ 1.0 万次
M14 螺钉冷锻模	Cr12MoV	氮碳共渗 渗剂: 甲醇: 氨 (2 ~ 3: 8 ~ 7) 工艺: $540 \sim 560^\circ\text{C} \times 3 \sim 4\text{h}$, 空冷或油冷	10 ~ 15 万次
级进式连续拉伸凹模	Cr12	盐浴渗钒: 渗剂: $\text{V}_2\text{O}_5 10\% + \text{Al}5\% + \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 85\%$ 工艺: $940 \sim 950^\circ\text{C} \times 3 \sim 4\text{h}$ 渗钒, 油冷, 200°C 回火	一次拉伸寿命可达 8 万次

注: 工艺配方中均为质量分数。

表 16-83 常用模具用钢气体渗氮和气体氮碳共渗工艺规范

钢 号	技术要求		渗氮温度 / $^\circ\text{C}$	气体比例		氮分 解率 (%)	保温 时间/h	应用
	硬度 HV	深度 /mm		氨气	载气体 (RX 气)			
3Cr2W8V 4Cr5MoSiV 4Cr5MoSiV1 4Cr5W2SiV	> 1000	0.05 ~ 0.10	530 ~ 550	50%	50%	30 ~ 40	5	压铸模、热锻模、热挤模、温挤模
		0.10 ~ 0.20		100%		30 ~ 40	10 ~ 20	
Cr12MoV Cr12Mo1V1 Cr5Mo1V	> 1000	0.03 ~ 0.05	510	40%	60%	30 ~ 40	3	冷锻模、冷挤模、冲裁模
		0.05 ~ 0.07		40%	60%	25 ~ 35	6	拉深模、弯曲模、陶土模
W6Mo5Cr4V2 W18Cr4V	> 1000	0.03 ~ 0.05	540	30%	70%	30 ~ 40	3	冲裁模、冷挤模
		0.05 ~ 0.07		50%	50%	30 ~ 40	5	拉深模、弯曲模
7Cr7Mo2V2Si 5Cr4Mo3SiMnVA1 6Cr4W3Mo2VNb	> 900	0.03 ~ 0.05	540	30%	70%	30 ~ 40	3	冲裁模、冷挤模、冷锻模
		0.05 ~ 0.07		50%	50%	30 ~ 40	5	拉深模、弯曲模
38CrMoAlA 25CrNi3MoAl 06Ni6CrMoVTiAl	> 900	0.30 ~ 0.40	530	90%	10%	25 ~ 35	25	塑料成型模
SM4Cr13 Cr12Mn5Ni4Mo3Al	> 900	0.10 ~ 0.20	530	90%	10%	30 ~ 40	10	塑料成型模

表 16-84 常用模具钢真空淬火工艺参数

钢材牌号	预 热		淬 火			回火温度 /℃	硬度 HRC
	温度 /℃	真空度 /Pa	温度 /℃	真空度 /Pa	冷却		
9SiCr	500 ~ 600	0.1	850 ~ 870	0.1	油(40℃以上)	170 ~ 190	61 ~ 63
CrWMn	500 ~ 600	0.1	820 ~ 840	0.1	油(40℃以上)	170 ~ 185	62 ~ 63
9Mn2V	500 ~ 600	0.1	780 ~ 820	0.1	油	180 ~ 200	62 ~ 62
5CrNiMo	500 ~ 600	0.1	840 ~ 860	0.1	油或 N ₂ 气	480 ~ 500	39 ~ 44.5
Cr5MoV	一次 500 ~ 550 二次 800 ~ 820	0.1	970 ~ 1000	10 ~ 1	油或 N ₂ 气	160 ~ 200	60 ~ 62
3Cr2W8V	一次 480 ~ 520 二次 800 ~ 850	0.1	1050 ~ 1100	10 ~ 1	油或 N ₂ 气	560 ~ 580 600 ~ 640	42 ~ 47 39 ~ 44.5
4Cr5W2SiV	一次 480 ~ 520 二次 800 ~ 850	0.1	1050 ~ 1100	10 ~ 1	油或 N ₂ 气	600 ~ 650	38 ~ 44
7CrSiMnMoV	500 ~ 600	0.1	880 ~ 900	0.1	油或 N ₂ 气	450 200	52 ~ 54 60 ~ 62
4Cr5MoSiV1	一次 500 ~ 550 二次 800 ~ 820	0.1	1020 ~ 1050	10 ~ 1	油或 N ₂ 气	560 ~ 600	45 ~ 50
Cr12	500 ~ 550	0.1	960 ~ 980	10 ~ 1	油或 N ₂ 气	180 ~ 240	60 ~ 64
Cr12MoV	一次 500 ~ 550 二次 800 ~ 850	0.1	980 ~ 1050 1080 ~ 1120	10 ~ 1	油或 N ₂ 气	180 ~ 240 500 ~ 540	60 ~ 64 58 ~ 60
W6Mo5Cr4V2	一次 500 ~ 600 二次 800 ~ 850	0.1	1100 ~ 1150 1150 ~ 1250	10	油或 N ₂ 气	200 ~ 300 540 ~ 600	58 ~ 62 62 ~ 66
W18Cr4V	一次 500 ~ 600 二次 800 ~ 850	0.1	1000 ~ 1100 1240 ~ 1300	10	油或 N ₂ 气	180 ~ 220 540 ~ 600	58 ~ 62 62 ~ 66

16.5 国外工模具钢钢号近似对照及热处理

1. 国外工模具钢钢号近似对照 (表 16-85 ~ 表 16-90)

表 16-85 中国与亚太各国 (地区) 以及国际标准的碳素工具钢钢号近似对照

No.	中国 GB	中国台湾 CNS	日本 JIS	韩国 KS	美 国		国际标准化组织 ISO
					ASTM	UNS	
1	T7	SK7	SK7	STC7	—	—	TC70
2	T8	SK5 SK6	SK5 SK6	STC5 STC6	W1A-8	T72301	TC80
3	T8Mn	SK5	SK5	STC5	—	—	—
4	T9	—	—	—	W1A-8 1/2	T72301	TC90
5	T10	SK3 SK4	SK3 SK4	STC3 STC4	W1A-9 1/2	T72301	TC105
6	T11	SK3	SK3	STC3	W1A-10 1/2	T72301	~ TC105

(续)

No.	中国 GB	中国台湾 CNS	日本 JIS	韩国 KS	美 国		际标准化组织 ISO
					ASTM	UNS	
7	T12	SK2	SK2	STC2	W1A-11 1/2	T72301	TC120
8	T13	SK1	SK1	STC1	—	—	TC140
9	T7A	—	—	—	—	—	—
10	T8A	—	—	—	—	T72301	—
11	T10A	—	—	—	—	T72301	—
12	T12A	—	—	—	—	T72301	—
13	T13A	—	—	—	—	—	—

表 16-86 中国与欧洲诸国的碳素工具钢钢号近似对照

No.	中 国 GB	德 国		法 国 NF	俄罗斯 ГОСТ	瑞 典 SS	英 国 BS
		DIN	W - Nr.				
1	T7	C70W2	1.1620	(C70E2U)	Y7	1770	—
2	T8	C80W2	1.1625	(C80E2U)	Y8	1778	—
3	T8Mn	C85WS	1.1830	—	Y8Γ	—	—
4	T9	—	—	C90E2U	Y9	—	—
5	T10	C105W2	1.1645	(C105E2U)	Y10	1880	BW1B
6	T11	C110W2	1.1654	~ C105E2U	Y11	—	—
7	T12	C125W2	1.1663	C120E3U	Y12	1885	BW1C
8	T13	C13W2	1.1673	~ C140E3U	Y13	—	—
9	T7A	C70W1	1.1520	C70E2U	Y7A	—	—
10	T8A	C80W1	1.1525	C80E2U	Y8A	—	—
11	T10A	C105W1	1.1545	C105E2U	Y10A	1880	—
12	T12A	C110W1	1.1550	—	Y12A	1885	—
13	T13A	C125W1	1.1560	—	Y13A	—	—

表 16-87 中国与亚太各国(地区)以及国际标准的合金工具钢钢号近似对照

No.	中 国 GB	中国台湾 CNS	日 本 JIS	韩 国 KS	美 国		国际标准化组织 ISO
					ASTM	UNS	
1	9SiCr	—	—	—	—	—	—
2	8MnSi	—	—	—	—	—	—
3	Cr06	SKS8	SKS8	STS8	—	—	—
4	Cr2	SUJ2	SUJ2	—	13	T61203	100Cr2
5	9Cr2	—	—	—	—	—	—
6	W	~ SKS21	~ SKS21	~ STS21	F1	T60601	—
7	4CrW2Si	~ SKS41	~ SKS41	~ STS41	—	—	—
8	5CrW2Si	—	—	—	S1	T41901	~ 45WCrV2
9	6CrW2Si	—	—	—	—	—	~ 60WCrV2

(续)

No.	中 国 GB	中国台湾 CNS	日 本 JIS	韩 国 KS	美 国		际标准化组织 ISO
					ASTM	UNS	
10	Cr12	SKD1	SKD1	STD1	D3	T30403	210Cr12
11	Cr12MoV	SKD11	SKD11	STD11	—	—	—
12	Cr12Mo1V1	—	—	—	D2	T30402	160CrMoV12
13	Cr5Mo1V	SKD12	SKD12	STD12	A2	T30102	100CrMoV5
14	9Mn2V	—	—	—	O2	T31502	90MnV2
15	CrWMn	SKS31	SKS31	STS31	—	—	105WCr1
16	9CrWMn	SKS3	SKS3	STS3	O1	T31501	95MnWCr1
17	5CrMnMo	—	—	—	—	—	—
18	5CrNiMo	SKT4	SKT4	STT4	L6	T61206	55NiCrMoV2
19	3Cr2W8V	SKD5	SKD5	STD5	H21	T20821	30WCrV9
20	8Cr3	—	—	—	—	—	—
21	4Cr3Mo3SiV	—	—	—	H10	T20810	—
22	4Cr5MoSiV	SKD6	SKD6	STD6	H11	T20811	35CrMoV5
23	4Cr5MoSiV1	SKD61	SKD61	STD61	H13	T20813	40CrMoV5
24	4Cr5W2VSi	—	—	—	—	—	—
25	3Cr2Mo	—	—	—	P20	T51620	35CrMo2
26	—	—	—	—	—	—	210CrW12
27	—	SKD4	SKD4	STD4	—	—	30WCrV5
28	—	SKD62	SKD62	STD62	H12	T20812	—

表 16-88 中国与欧洲诸国的合金工具钢钢号近似对照

No.	中 国 GB	德 国		法 国 NF	俄罗斯 ГОСТ	瑞 典 SS	英 国 BS
		DIN	W-Nr.				
1	9SiCr	90CrSi5	1.2108	—	9XC	2092	—
2	8MnSi	~ C75W	1.1750	—	—	—	BW1A
3	Cr06	140Cr3	1.2008	130Cr3	X05	—	—
4	Cr2	100Cr6	1.2067	Y100C6	X	—	BL1 BL3
5	9Cr2	90Cr3	1.2056	—	9X1	—	BL3
6	W	120W4	1.2414	—	B1	2705	BF1
7	4CrW2Si	—	—	—	4XB2C	—	—
8	5CrW2Si	~ 45WCrV7	1.2542	~ 45WCrV8	5XB2C	~ 2710	BS1
9	6CrW2Si	~ 60WCrV7	1.2550	(~ 55WC20)	6XB2C	—	—
10	Cr12	X210Cr12	1.2080	X200Cr12	X12	—	BD3
11	Cr12MoV	X165CrMoV12	1.2601	—	X12M	2310	—
12	Cr12Mo1V1	X155CrMoV12-1	1.2379	X160CrMoV12	—	—	BD2
13	Cr5Mo1V	X100CrMoV5-1	1.2363	X100CrMoV5	—	2260	BA2
14	9Mo2V	90MnCrV8	1.2842	90MnV8	—	—	BO2

(续)

No.	中 国 GB	德 国		法 国 NF	俄罗斯 ГОСТ	瑞 典 SS	英 国 BS
		DIN	W - Nr.				
15	CrWMn	105WCr6	1.2419	105WCr5	XBT	—	—
16	9CrWMn	100MnCrW4	1.2510	90MnWCrV5	9XBT	2140	BO1
17	5CrMnMo	~ 40CrMnMo7	1.2311	—	5XTM	—	—
18	5CrNiMo	55NiCrMoV6	1.2713	55NiCrMoV7	5XHM	~ 2550	BH224/5
19	3Cr2W8V	X30WCrV9-3	1.2581	X30WCrV9	3X2B8Φ	2730	BH21
20	8Cr3	—	—	—	8X3	—	—
21	4Cr3Mo3SiV	~ X32CrMo V3-3	1.2365	~ 32CrMo V12-28	3X3M3Φ	—	BH10
22	4Cr5Mo3SiV	X38CrMoV5-1	1.2343	X38CrMoV5	4X5MCΦ	—	BH11
23	4Cr5MoSiV1	X40CrMoV5-1	1.2344	X40CrMoV5	4X5MCΦ1	—	BH13

表 16-89 中国与亚太各国(地区)以及国际标准的高速工具钢钢号近似对照

No.	中 国 GB	中国台湾 CNS	日 本 JIS	韩 国 KS	美 国		国际标准化组织 ISO
					ASTM	UNS	
1	W18Cr4V	SKH2	SKH2	SKH2	T1	T12001	HS 18-0-1
2	W18Cr4VCo5	SKH3	SKH3	SKH3	T4	T12004	HS 18-1-1-5
3	W18Cr4V2Co8	~ SKH4	~ SKH4	~ SKH4	T5	T12005	—
4	W12Cr4V5Co5	SKH10	SKH10	SKH10	T15	T12015	HS 12-1-5-5
5	W6Mo5Cr4V2	SKH9	SKH9	SKH9	M2 (正常 C)	T11302	HS 6-5-2
6	CW6Mo5Cr4V2	—	—	—	M2 (高 C)	T11302	—
7	W6Mo5Cr4V3	SKH52	SKH52	SKH52	M3 Class 1	T11313	—
8	CW6Mo5Cr4V3	SKH53	SKH53	SKH53	M3 Class 2	T11323	HS 6-5-3
9	W2Mo9Cr4V2	—	—	—	M7	T11307	HS 2-9-2
10	W6Mo5Cr4V2Co5	SKH55	SKH55	SKH55	—	—	HS 6-5-2-5
11	W7Mo4Cr4V2Co5	—	—	—	M41	T11341	HS 7-4-2-5
12	W2Mo9Cr4VCo8	SKH59	SKH59	SKH59	M42	T11342	HS 2-9-1-8
13	—	SKH57	SKH57	SKH57	—	—	HS 10-4-3-10
14	—	—	—	—	M43 M44	T11343 T11344	—

表 16-90 中国与欧洲诸国的合金工具钢钢号近似对照

No.	中 国 GB	德 国		法 国 NF	俄罗斯 ГОСТ	瑞 典 SS	英 国 BS
		DIN	W-Nr.				
1	W18Cr4V	S 18-0-1	1.3355	HS 18-0-1	P18	2750	BT1
2	W18Cr4VCo5	S 18-1-2-5	1.3255	HS 18-1-1-5	~ P18K5Φ2	2754	BT4
3	W18Cr4V2Co8	~ S18-1-2	1.3265	HS 18-0-2-9	—	2756	BT5
4	W12Cr4V5Co5	S 12-1-4-5	1.3202	HS 12-1-5-5	P10K5Φ5	—	BT15
5	W6Mo5Cr4V2	S 6-5-2	1.3343	—	P6M5	2722	BM2
6	CW6Mo5Cr4V2	SC 6-5-2	1.3342	HS 6-5-2HC	—	—	—
7	W6Mo5Cr4V3	—	—	—	P6M5Φ3	—	—
8	CW6Mo5Cr4V3	S 6-5-3	1.3344	HS 6-5-3	—	2725	—
9	W2Mo9Cr4V2	S 2-9-2	1.3348	HS 2-9-2	—	2782	—
10	W6Mo5Cr4V2Co5	S 6-5-2-5	1.3243	HS 6-5-2-5	P6M5K5	2723	—
11	W7Mo4Cr4V2Co5	S 7-4-2-5	1.3246	HS 7-4-2-5	—	—	M41
12	W2Mo9Cr4VCo8	S 2-10-1-8	1.3247	HS 2-9-1-8	—	2716	BM42
13	—	S 10-4-3-10	1.3207	HS 10-4-3-10	—	—	BT42
14	—	S 2-9-2-8	1.3249	—	—	—	BM34

2. 国外工模具钢的热处理(表 16-91 ~ 表 16-124)

表 16-91 日本碳素工具钢的热加工、热处理规范与硬度

钢 号	热加工温度/℃		退火温度 /℃	退火后硬度 /℃	淬火温度 /℃	淬火 介质	回火温度 /℃	淬回火后 硬度 HRC
	开始	终止						
SK 140	1000 ~ 1050	≤ 850	750 ~ 780	≤ 217	750 ~ 810	水	150 ~ 200	≥ 63
SK 120	1000 ~ 1050	≤ 850	750 ~ 780	≤ 217	750 ~ 810	水	150 ~ 200	≥ 62
SK 105	1000 ~ 1050	≤ 850	750 ~ 780	≤ 217	750 ~ 810	水	150 ~ 200	≥ 61
SK 95	1050 ~ 1100	≤ 850	740 ~ 760	≤ 207	750 ~ 810	水	150 ~ 200	≥ 61
SK 90	1050 ~ 1100	≤ 850	740 ~ 760	≤ 207	750 ~ 810	水	150 ~ 200	≥ 60
SK 85	1050 ~ 1100	≤ 850	730 ~ 760	≤ 207	750 ~ 810	水	150 ~ 200	≥ 59
SK 80	1050 ~ 1100	≤ 850	730 ~ 760	≤ 192	760 ~ 820	水	150 ~ 200	≥ 58
SK 75	1050 ~ 1100	≤ 850	730 ~ 760	≤ 192	760 ~ 820	水	150 ~ 200	≥ 57
SK 70	1050 ~ 1100	≤ 850	730 ~ 760	≤ 183	770 ~ 830	水	150 ~ 200	≥ 57
SK 65	1050 ~ 1100	≤ 850	730 ~ 760	≤ 183	770 ~ 830	水	150 ~ 200	≥ 56
SK 60	1050 ~ 1100	≤ 850	730 ~ 760	≤ 183	780 ~ 840	水	150 ~ 200	≥ 55

表 16-92 日本合金工具钢的热加工、热处理规范与硬度

钢 号	热加工温度/℃		退火温度 /℃	退火后硬度 HRC	淬火温度 ^① /℃	淬火 介质	回火温度 ^① /℃	淬火回火后 硬度 HRC
	开始	终止						
刀具用钢								
SKS 11	1050	800	780 ~ 850	≤214	790	水	180	≥62
SKS 2	1050	850	750 ~ 800	≤217	860	油	180	≥61

(续)

钢 号	热加工温度/℃		退火温度 /℃	退火后硬度 HRC	淬火温度 ^① /℃	淬火 介质	回火温度 ^① /℃	淬火回火后 硬度 HRC
	开始	终止						
刀具用钢								
SKS 21	1050	850	750 ~ 800	≤ 217	800	水	180	≥ 61
SKS 5	1050	850	750 ~ 800	≤ 207	830	油	420	≥ 45
SKS 51	1050	850	750 ~ 800	≤ 207	830	油	420	≥ 45
SKS 7	1050	850	750 ~ 800	≤ 217	860	油	180	≥ 62
SKS 81	1050	850	750 ~ 800	≤ 212	790	水	180	≥ 63
SKS 8	1050	850	750 ~ 800	≤ 217	810	水	180	≥ 63
耐冲击工具钢								
SKS 4	1050	850	740 ~ 780	≤ 201	800	水	180	≥ 56
SKS 41	1050	850	760 ~ 820	≤ 217	880	油	180	≥ 53
SKS 43	1020	800	750 ~ 800	≤ 217	790	水	180	≥ 63
SKS 44	1050	800	730 ~ 780	≤ 207	790	水	180	≥ 60
冷作模具钢								
SKS 3	1000	800	750 ~ 800	≤ 217	830	油	180	≥ 60
SKS 31	1000	800	750 ~ 800	≤ 217	830	油	180	≥ 61
SKS 93	1000	800	750 ~ 800	≤ 217	820	油	180	≥ 63
SKS 94	—	—	740 ~ 760	≤ 212	820	油	180	≥ 61
SKS 95	—	—	730 ~ 760	≤ 212	820	油	180	≥ 59
SKD 1	1000	800	830 ~ 880	≤ 248	970	空冷	180	≥ 62
SKD 2	1000	800	830 ~ 880	≤ 255	970	空冷	180	≥ 62
SKD 10	1000	800	830 ~ 880	≤ 255	1020	空冷	180	≥ 61
SKD 11	1000	800	830 ~ 880	≤ 255	1030	空冷	180	≥ 58
SKD 12	1000	800	830 ~ 880	≤ 241	970	空冷	180	≥ 60
热作模具钢								
SKD 4	1100	900	800 ~ 850	≤ 235	1080	油	600	≥ 42
SKD 5	1100	900	800 ~ 850	≤ 241	1500	油	600	≥ 48
SKD 6	1100	900	820 ~ 870	≤ 229	1050	空冷	550	≥ 48
SKD 61	1100	900	820 ~ 870	≤ 229	1020	空冷	550	≥ 50
SKD 62	1100	900	820 ~ 870	≤ 229	1020	空冷	550	≥ 48
SKD 7	1100	900	820 ~ 870	≤ 229	1040	空冷	550	≥ 46
SKD 8	1100	900	820 ~ 870	≤ 262	1120	油	600	≥ 48
SKT 3	1050	850	760 ~ 810	≤ 235	850	油	500	≥ 42
SKT 4	1050	850	740 ~ 800	≤ 248	850	油	500	≥ 42
SKT 6	1050	850	720 ~ 780	≤ 285	850	油	180	≥ 52

① 表中淬火回火温度的容许范围 ± 10℃, 回火冷却介质均为空冷。

表 16-93 日本高速工具钢的热加工、热处理规范与硬度

钢 号	热加工温度/℃		退火温度 /℃	退火后硬度 /℃	淬火温度 /℃	淬火 介质	回火温度 ^① /℃	淬火回火后 硬度 HRC
	开始	终止						
钨系高速工具钢								
SKH 2	1150	800	820 ~ 880	≤ 269	1260	油	560	≥ 63
SKH 3	1250	850	840 ~ 900	≤ 269	1270	油	560	≥ 64
SKH 4	1200	850	850 ~ 910	≤ 285	1270	油	560	≥ 64
SKH 10	1150	850	820 ~ 900	≤ 285	1230	油	560	≥ 64
粉末冶金高速工具钢								
SKH 40	—	—	800 ~ 880	≤ 302	1180	油	560	≥ 65
钨钼系高速工具钢								
SKH 50	—	—	800 ~ 880	≤ 262	1190	油	560	≥ 63
SKH 51	1150	950	800 ~ 880	≤ 262	1220	油	560	≥ 64
SKH 52	1150	950	800 ~ 880	≤ 262	1200	油	560	≥ 64
SKH 53	1150	950	800 ~ 880	≤ 269	1200	油	560	≥ 64
SKH 54	1150	900	800 ~ 880	≤ 269	1210	油	560	≥ 64
SKH 55	1180	950	800 ~ 880	≤ 269	1210	油	560	≥ 64
SKH 56	1180	950	800 ~ 880	≤ 285	1210	油	560	≥ 64
SKH 57	1180	950	800 ~ 880	≤ 293	1230	油	560	≥ 66
SKH 58	—	—	800 ~ 880	≤ 269	1200	油	560	≥ 64
SKH 59	—	—	800 ~ 880	≤ 277	1190	油	550	≥ 66

① 各钢号均进行两次回火。

表 16-94 德国碳素工具钢的热加工、热处理与硬度

钢 号	材料号 W-Nr.	热加工 温度 /℃	退火 温度 /℃	退火后 硬度 ≤ HBW		退火后 抗拉强度 ≤ /MPa		淬火温度 及冷却介质		硬度 ^① HRC	回火温度 /℃
				棒	板	棒	板	温度/℃	介质		
C70W1	1.1520	1000 ~ 800	680 ~ 710	190	—	640	—	790 ~ 820	水	63	180 ~ 300
C80W1	1.1525	1050 ~ 800	680 ~ 710	190	—	640	—	780 ~ 810	水	64	180 ~ 300
C105W1	1.1545	1000 ~ 800	680 ~ 710	190	248	640	830	770 ~ 800	水	65	180 ~ 300
C110W2	1.1554	1000 ~ 800	680 ~ 710	195	—	660	—	770 ~ 800	水	65	180 ~ 300
C125W	1.1563	1000 ~ 800	680 ~ 710	210	—	710	—	760 ~ 790	水	65	180 ~ 300
C135W	1.1573	1000 ~ 800	680 ~ 710	230	—	780	—	750 ~ 780	水	65	180 ~ 300
C70W2	1.1620	1000 ~ 800	680 ~ 710	190	—	640	760	790 ~ 820	水	63	180 ~ 300
C80W2	1.1625	1000 ~ 800	680 ~ 710	190	—	640	—	780 ~ 810	水	64	180 ~ 300
C105W2	1.1645	1000 ~ 800	700 ~ 720	190	—	640	—	770 ~ 800	水	65	180 ~ 300
C45W	1.1730	1050 ~ 800	680 ~ 710	190	207	640	700	800 ~ 830	水	58	180 ~ 300
C60W	1.1740	1100 ~ 800	680 ~ 710	207	—	700	—	800 ~ 830	水 ^② 或油	58 ^②	180 ~ 300

(续)

钢 号	材料号 W-Nr.	热加工 温度 /℃	退火 温度 /℃	退火后 硬度 ≤ HBW		退火后 抗拉强度 ≤ /MPa		淬火温度 及冷却介质		硬度 ^① HRC	回火温度 /℃
				棒	板	棒	板	温度/℃	介质		
C67W	1.1744	1100 ~ 800	680 ~ 710	217	248	730	830	800 ~ 840	油	60 ^②	180 ~ 300
C75W	1.1750	1050 ~ 800	680 ~ 710	217	—	730	—	790 ~ 820	油	62 ^②	180 ~ 300
C55W	1.1820	1100 ~ 800	680 ~ 710	170	—	570	—	790 ~ 820	水	60	180 ~ 300
C85W	1.1830	1100 ~ 800	680 ~ 710	(225)	248	(760)	830	800 ~ 830	油	60	180 ~ 300

① 经过数据处理的硬度值。

② 适用于直径 < 12mm 的棒材或厚度 < 5mm 的薄板。

③ 对于直径较大者亦可于(780 ~ 820)℃水淬。

表 16-95 德国冷作合金工具钢的热加工、热处理与硬度

钢 号	材料号 W-Nr.	热加工 温度 /℃	退火 温度 /℃	退火 后硬 度 ≤ HBW	淬火温度 及冷却介质		常用回 火温度 /℃	下列温度回火后硬度 HRC			
					温度 /℃	介质		100℃	200℃	300℃	400℃
125Cr1	1.2002	1000 ~ 800	700 ~ 720	200	770 ~ 800	水	180 ~ 200	66	63	57	50
75Cr1	1.2003	1000 ~ 800	700 ~ 720	200	770 ~ 800	水	180 ~ 200	66	60	52	43
85Cr1	1.2004	1050 ~ 850	680 ~ 720	210	800 ~ 830	油	150 ~ 300	64	61	56	50
140Cr3	1.2008	1000 ~ 800	700 ~ 740	235	770 ~ 800	油	100 ~ 200	66	64	60	—
90Cr3	1.2056	1050 ~ 850	710 ~ 740	210	770 ~ 800	水	180 ~ 250	65	62	56	—
105Cr4	1.2057	1050 ~ 850	710 ~ 740	210	800 ~ 860	水或油	180 ~ 250	65	63	57	50
145Cr6	1.2063	1050 ~ 850	750 ~ 780	225	820 ~ 850	油	150 ~ 250	64	63	60	56
100Cr6	1.2067	1050 ~ 850	740 ~ 770	230	820 ~ 850	油	100 ~ 180	64	61	56	50
X210Cr12	1.2080	1050 ~ 850	800 ~ 830	250	940 ~ 970	油 ^①	100 ~ 250	63	62	60	57
X42Cr13	1.2083	1100 ~ 800	750 ~ 800	225	1020 ~ 1050	油	150 ~ 300	56	55	52	51
X33CrS16	1.2085	1100 ~ 800	850 ~ 880	230	1000 ~ 1050	油	—	48	48	47	46

(续)

钢 号	材料号 W-Nr.	热加工 温度 /℃	退火 温度 /℃	退火 后硬 度 ≤ HBW	淬火温度 及冷却介质		常用回 火温度 /℃	下列温度回火后硬度 HRC			
					温度 /℃	介质		100℃	200℃	300℃	400℃
62SiMnCr4	1.2101	1050 ~ 850	710 ~ 750	225	830 ~ 860	油	240 ~ 350	61	59	56	50
58SiCr8	1.2103	1050 ~ 850	700 ~ 720	230	840 ~ 850	油	400 ~ 500	57	54	50	45
90CrSi5	1.2108	1050 ~ 850	710 ~ 740	230	830 ~ 850	油	180 ~ 250	65	62	58	54
125CrSi5	1.2109	1050 ~ 850	710 ~ 740	230	830 ~ 860	油	180 ~ 250	64	62	58	—
105MnCr4	1.2127	1050 ~ 850	680 ~ 720	220	800 ~ 860	油	180 ~ 250	64	62	57	—
200CrMn8	1.2129	1050 ~ 900	760 ~ 800	250	820 ~ 850	油	180 ~ 250	64	63	60	51
21MnCr5	1.2162	1050 ~ 850	680 ~ 710	215	810 ~ 840	油	150 ~ 180	61 ^②	60 ^②	57 ^②	54 ^②
X165CrV12	1.2201	1050 ~ 850	800 ~ 830	230	960 ~ 1000	油 ^①	180 ~ 250	64	63	60	58
140CrV1	1.2206	1000 ~ 850	710 ~ 740	210	770 ~ 800	水	100 ~ 150	65	62	56	—
31CrV3	1.2208	1050 ~ 850	680 ~ 720	220	830 ~ 860	水	180 ~ 250	52	50	47	43
115CrV3	1.2210	1050 ~ 850	710 ~ 740	220	760 ~ 840	水或油	180 ~ 250	64	61	58	—
80CrV2	1.2235	1050 ~ 800	680 ~ 710	250	800 ~ 830	油	180 ~ 300	63	60	55	50
51CrV4	1.2241	1050 ~ 850	680 ~ 710	225	820 ~ 850	油	180 ~ 300	56	54	51	47
59CrV4	1.2242	1050 ~ 850	710 ~ 750	225	820 ~ 850	油	180 ~ 300	61	59	56	52
61CrSiV5	1.2243	1050 ~ 850	700 ~ 740	220	850 ~ 880	油	180 ~ 300	62	61	57	52
38SiCrV6	1.2248	1050 ~ 850	710 ~ 750	215	880 ~ 930	水	180 ~ 350	55	54	52	50
45SiCrV6	1.2249	1050 ~ 850	710 ~ 750	220	860 ~ 890	油	180 ~ 300	58	57	53	51

(续)

钢 号	材料号 W-Nr.	热加工 温度 /℃	退火 温度 /℃	退火 后硬 度 ≤ HBW	淬火温度 及冷却介质		常用回 火温度 /℃	下列温度回火后硬度 HRC			
					温度 /℃	介质		100℃	200℃	300℃	400℃
100CrMo5	1.2303	1000 ~ 850	700 ~ 730	230	820 ~ 860	油或空冷	400 ~ 600	55	54	52	49
102CrMo6	1.2305	1000 ~ 850	740 ~ 770	230	830 ~ 860	油	180 ~ 250	64	63	60	—
29CrMoV9	1.2307	1050 ~ 850	680 ~ 720	240	850 ~ 880	油	400 ~ 600	(880 ~ 1080)MPa(+ 渗氮)			
40CrMnMo7	1.2311	1050 ~ 850	580 ~ 600	230	830 ~ 870	油	500 ~ 650	51	50	48	46
40CrMnMoS8-6	1.2312	1050 ~ 850	760 ~ 780	230	830 ~ 870	油 ^①	640 ~ 680	51	50	48	45
X36CrMo17	1.2316	1100 ~ 750	780 ~ 820	250	1000 ~ 1080	油	650 ~ 700	49	47	46	46
X64CrMo14	1.2319	1100 ~ 900	790 ~ 840	240	1030 ~ 1060	油	180 ~ 200	59	58	53	53
86CrMoV7	1.2327	1100 ~ 900	710 ~ 750	250	820 ~ 860	水或油	180 ~ 300	64	60	56	52
45CrMoV7	1.2328	1000 ~ 850	690 ~ 730	250	840 ~ 860	空冷	—	—	—	—	—
X6CrMo4	1.2341	1050 ~ 850	820 ~ 840	110	840 ~ 900	油或空冷	200 ~ 250	62 ^②	58 ^②	57 ^②	—
27CrMoV6-12	1.2353	1100 ~ 850	740 ~ 770	223	950 ~ 980	水	550 ~ 700	—	—	—	—
X91CrMoV18	1.2361	1100 ~ 850	800 ~ 850	265	1000 ~ 1050	油	180 ~ 300	58	56	54	54
X63CrMoV5-1	1.2362	1000 ~ 800	800 ~ 820	225	980 ~ 1000	油或空冷	180 ~ 250	60	59	57	57
X100CrMoV5-1	1.2363	1050 ~ 850	800 ~ 840	230	930 ~ 970	油或空冷	180 ~ 400	63	62	60	57
81MoCrV42-16	1.2369	1050 ~ 850	800 ~ 840	250	1070 ~ 1100	油	≥ 550	61	60	57	57
X96CrMoV12	1.2376	1100 ~ 800	820 ~ 850	250	1010 ~ 1050	油	180 ~ 500	62	61	59	57
X220CrVMo12-2	1.2378	1000 ~ 850	870 ~ 900	255	1050 ~ 1100	油或空冷	550 ~ 570	62	61	59	59

(续)

钢 号	材料号 W-Nr.	热加工 温度 /℃	退火 温度 /℃	退火 后硬 度 ≤ HBW	淬火温度 及冷却介质		常用回 火温度 /℃	下列温度回火后硬度 HRC			
					温度 /℃	介质		100℃	200℃	300℃	400℃
X155CrVMo12-1	1.2379	1000 ~ 850	830 ~ 850	250	1020 ~ 1040	油或空冷	180 ~ 250	63	61	59	58
73MoV5-2	1.2381	1000 ~ 850	700 ~ 720	280	840 ~ 860	油	180 ~ 300	64	59	56	—
120W4	1.2414	1050 ~ 850	710 ~ 750	220	780 ~ 810	水	200 ~ 300	66	63	60	53
105WCr6	1.2419	1050 ~ 850	720 ~ 750	230	800 ~ 830	油	150 ~ 250	64	61	58	54
X210CrW12	1.2436	1000 ~ 850	800 ~ 830	255	930 ~ 980	油或空冷	180 ~ 250	63	62	60	58
115W8	1.2442	1050 ~ 850	710 ~ 750	220	800 ~ 830	油	180 ~ 250	65	63	60	55
X130W5	1.2453	1050 ~ 850	710 ~ 750	225	790 ~ 830	水	100 ~ 250	67	64	60	52
100MnCrW4	1.2510	1050 ~ 850	740 ~ 770	230	780 ~ 820	油	180 ~ 250	64	62	57	53
120WV4	1.2516	1050 ~ 850	710 ~ 740	230	780 ~ 810	水	180 ~ 250	65	62	57	51
110WCrV5	1.2519	1050 ~ 850	720 ~ 750	225	800 ~ 830	油	180 ~ 250	64	62	59	—
45WCrV7	1.2542	1050 ~ 850	720 ~ 750	225	890 ~ 930	油	180 ~ 300	57	56	54	52
60WCrV7	1.2550	1050 ~ 850	720 ~ 750	225	870 ~ 900	油	180 ~ 300	60	58	56	52
80WCrV8	1.2552	1050 ~ 850	710 ~ 750	230	860 ~ 890	油	180 ~ 300	61	60	58	—
142WV13	1.2562	1000 ~ 850	760 ~ 780	240	840 ~ 860	水或油	100 ~ 180	67	63	60	54
X165CrMoV12	1.2601	1050 ~ 850	800 ~ 830	255	980 ~ 1010	油或空冷	180 ~ 250	63	61	60	58
73WCrMoV2-2	1.2604	1050 ~ 800	680 ~ 710	225	810 ~ 840	油	180 ~ 300	63	61	58	53
X50CrMoW9-1-1	1.2631	1100 ~ 850	750 ~ 800	230	1020 ~ 1050	油	180 ~ 300	58	57	56	55

(续)

钢 号	材料号 W-Nr.	热加工 温度 /℃	退火 温度 /℃	退火 后硬 度 ≤ HBW	淬火温度 及冷却介质		常用回 火温度 /℃	下列温度回火后硬度 HRC			
					温度 /℃	介质		100℃	200℃	300℃	400℃
74NiCr2	1.2703	1100 ~ 850	720 ~ 750	248	810 ~ 840	油或水	150 ~ 500	60	58	55	48
X3NiCoMoTi18-9-5	1.2709	1050 ~ 850	820 ~ 850	— ^③	480	空冷	—	—	—	—	—
45NiCr6	1.2710	1050 ~ 850	660 ~ 700	240	830 ~ 860	油	180 ~ 350	56	54	52	48
54NiCrMoV6	1.2711	1050 ~ 850	650 ~ 700	225	830 ~ 870	油	620 ~ 700	56	54	51	47
55NiCrMoV6	1.2713	1050 ~ 850	680 ~ 710	240	830 ~ 870	油	160 ~ 300	56	54	51	47
55NiCr10	1.2718	1050 ~ 850	610 ~ 630	250	840 ~ 870	油	160 ~ 300	59	56	52	48
50NiCr13	1.2721	1050 ~ 850	610 ~ 650	250	840 ~ 870	油或空冷	160 ~ 300	59	56	52	48
15NiCr14	1.2735	1050 ~ 850	620 ~ 650	200	780 ~ 800	油	150 ~ 180	62 ^②	60 ^②	—	—
40CrMnNiMo8-6-4	1.2738	1050 ~ 850	710 ~ 740	235	840 ~ 870	油	180 ~ 220	51	50	48	46
60NiCrMoV12-4	1.2743	1050 ~ 850	690 ~ 700	235	840 ~ 870	油	180 ~ 250	61	59	54	50
15NiCr18	1.2745	1050 ~ 850	600 ~ 630	250	780 ~ 800	油	150 ~ 180	61 ^②	60 ^②	58	—
45NiCrMoV16-6	1.2746	1050 ~ 850	610 ~ 650	295	880 ~ 910	油或空冷	160 ~ 250	56	54	52	50
75CrMoNiW6-7	1.2762	1050 ~ 850	710 ~ 750	210	870 ~ 900	油	160 ~ 300	63	60	55	—
X19NiCrMo4	1.2764	1050 ~ 850	620 ~ 660	255	780 ~ 810	油	150 ~ 180	62	60	58	56
X45NiCrMo4	1.2767	1050 ~ 850	610 ~ 630	260	840 ~ 870	油或空冷	160 ~ 250	56	54	50	46
70Si7	1.2823	1100 ~ 850	710 ~ 740	240	810 ~ 850	油	300 ~ 500	59	56	53	47
60MnSi4	1.2826	1050 ~ 850	680 ~ 720	220	820 ~ 850	油	300 ~ 500	61	59	57	52

(续)

钢 号	材料号 W-Nr.	热加工 温度 /℃	退火 温度 /℃	退火 后硬 度 ≤ HBW	淬火温度 及冷却介质		常用回 火温度 /℃	下列温度回火后硬度 HRC			
					温度 /℃	介质		100℃	200℃	300℃	400℃
100V1	1.2833	1050 ~ 850	730 ~ 760	230	780 ~ 820	水	180 ~ 280	65	63	57	—
145V33	1.2838	1100 ~ 900	760 ~ 780	230	800 ~ 950	水	180 ~ 300	64	62	56	48
90MnCrV8	1.2842	1050 ~ 850	680 ~ 720	220	790 ~ 820	油	150 ~ 250	63	60	56	50
X165CrCoMo12	1.2880	1050 ~ 850	800 ~ 830	260	950 ~ 1050	油或空冷	180 ~ 250	63	62	60	58
X210CrCoW12	1.2884	1050 ~ 900	810 ~ 840	260	960 ~ 1000	油或空冷	180 ~ 250	64	63	61	58

① 用油或 400℃ 热浴。

② 表面硬化后的表层硬度。

③ 950 ~ 1100MPa。

表 16-96 德国热作合金工具钢的热加工、热处理与硬度

钢 号	材料号 W-Nr.	热加工 温度 /℃	退火 温度 /℃	退火 后硬 度 ≤ HBW	淬火温度 及冷却介质		常用回 火温度 /℃	下列温度回火后硬化值 /MPa			
					温度 /℃	介质		400℃	500℃	600℃	650℃
X21Cr13	1.2082	1150 ~ 800	760 ~ 800	200	960 ~ 1010	油 ^①	450 ~ 600	—	1320	980	—
X42Cr13	1.2083	1100 ~ 800	750 ~ 800	225	1020 ~ 1050	油	400 ~ 600	1910	1860	1130	930
59CrV4	1.2242	1050 ~ 850	710 ~ 750	235	820 ~ 850	油	400 ~ 600	1720	1370	1080	—
38SiCrV6	1.2248	1050 ~ 850	710 ~ 750	214	880 ~ 930	水	300 ~ 650	1620	1470	1230	1080
29CrMoV9	1.2307	1050 ~ 850	680 ~ 720	240	850 ~ 880	油	400 ~ 550	1720	1470	—	—
65MnCrMo4	1.2309	1050 ~ 850	700 ~ 750	(740 MPa)	850 ~ 880	油或 空冷	640 ~ 700	—	—	1280	1170
40CrMnMo7	1.2311	1050 ~ 850	580 ~ 600	230	830 ~ 870	油 ^③	500 ~ 650	—	1470	1180	1030
21CrMo10	1.2313	1050 ~ 850	700 ~ 740	200	920 ~ 950	水或油	300 ~ 650	1420	1270	1080	980

(续)

钢 号	材料号 W-Nr.	热加工 温度 /℃	退火 温度 /℃	退火 后硬 度 ≤ HBW	淬火温度 及冷却介质		常用回 火温度 /℃	下列温度回火后硬化值 /MPa			
					温度 /℃	介质		400℃	500℃	600℃	650℃
48CrMoV6-7	1.2323	1050 ~ 850	740 ~ 770	215	950 ~ 1000	油	550 ~ 650	—	1670	1470	1230
X35CrMoV5-1-1	1.2324	1100 ~ 900	750 ~ 800	230	1000 ~ 1040	油或 空冷	550 ~ 650	1630	1670	1480	1140
X38CrMoV5-1	1.2343	1100 ~ 900	760 ~ 780	235	1020 ~ 1050	油 ^① 或 空冷	550 ~ 650	—	2060	1620	1230
X40CrMoV5-1	1.2344	1100 ~ 900	750 ~ 780	235	1020 ~ 1060	油 ^① 或 空冷	550 ~ 650	—	2060	1720	1320
X50CrMoV5-1	1.2345	1100 ~ 900	800 ~ 830	229	1020 ~ 1050	油	450 ~ 550	2100	2170	1780	1450
50CrMoV13-14	1.2357	1050 ~ 850	800 ~ 840	248	950 ~ 1010	油	510	53 ^②	51 ^②	47 ^②	—
X48CrMoV8-1-1	1.2360	1000 ~ 800	830 ~ 860	240	1070 ~ 1100	油	550 ~ 700	2330	2370	1620	1270
X63CrMoV5-1	1.2362	1000 ~ 800	800 ~ 820	225	980 ~ 1000	油 ^① 或 空冷	400 ~ 550	57 ^②	57 ^②	48 ^②	—
X32CrMoV3-3	1.2365	1050 ~ 900	760 ~ 780	230	1020 ~ 1050	油 ^① 或 空冷	500 ~ 670	—	1670	1570	1320
X40CrMoV5-3	1.2367	1050 ~ 850	800 ~ 840	235	1030 ~ 1080	油 ^① 或 空冷	600 ~ 700	—	—	1860	1470
45WCrV7	1.2542	1050 ~ 850	720 ~ 750	225	890 ~ 930	油	550 ~ 650	—	1570	1320	1180
60WCrV7	1.2550	1050 ~ 850	720 ~ 750	230	860 ~ 900	油	300 ~ 400	1780	—	—	—
X30WCrV4-1	1.2564	1050 ~ 850	750 ~ 780	230	1000 ~ 1050	油	450 ~ 650	—	1520	1370	1270
X30WCrV5-3	1.2567	1100 ~ 900	760 ~ 800	240	1050 ~ 1100	油 ^①	600 ~ 680	—	1690	1670	1520
X30WCrV9-3	1.2581	1100 ~ 850	740 ~ 780	240	1100 ~ 1150	油 ^{①②}	600 ~ 700	1770	1720	1670	1470
45CrVMoW5-8	1.2603	1100 ~ 850	740 ~ 780	240	1000 ~ 1050	油 ^①	600 ~ 680	1720	1690	1670	1520
X37CrMoW5-1	1.2606	1100 ~ 900	750 ~ 790	230	1020 ~ 1050	油 ^① 或 空冷	550 ~ 650	2060	2160	1520	1230

(续)

钢 号	材料号 W-Nr.	热加工 温度 /℃	退火 温度 /℃	退火 后硬 度 ≤ HBW	淬火温度 及冷却介质		常用回 火温度 /℃	下列温度回火后硬化值 /MPa			
					温度 /℃	介质		400℃	500℃	600℃	650℃
X60WCrMoV9-4	1.2622	1100 ~ 900	760 ~ 800	270	1150 ~ 1200	油 ^{①③}	500 ~ 650	—	2060	1910	1670
X30WCrCoV9-3	1.2662	1100 ~ 880	760 ~ 800	250	1130 ~ 1180	油 ^①	550 ~ 700	—	1720	1770	1620
X45CoCrWV5-5-5	1.2678	1100 ~ 900	760 ~ 800	260	1110 ~ 1140	油 ^①	650 ~ 720	—	1910	1910	1670
X3NiCoMoTi18-9-5	1.2709	1100 ~ 900	840	37 ^②	480	空冷	—	—	—	—	—
45NiCr6	1.2710	1050 ~ 850	660 ~ 700	240	830 ~ 860	油	400 ~ 600	1620	1420	1130	930
55NiCrMoV6	1.2713	1050 ~ 850	680 ~ 710	240	840 ~ 870	油	500 ~ 650	1620	1420	1230	1030
56NiCrMoV7	1.2714	1050 ~ 850	680 ~ 710	250	840 ~ 870	油	400 ~ 650	1770	1570	1320	1180
26NiCrMoV5	1.2726	1050 ~ 850	670 ~ 700	240	840 ~ 870	油	400 ~ 600	1420	1370	1270	1180
X50NiCrWV13-13	1.2731	1050 ~ 850	—	—	980 ~ 1030	油	—	—	—	—	—
28NiCrV5	1.2737	1050 ~ 850	700 ~ 740	240	850 ~ 880	油或 空冷	400 ~ 600	1370	1320	1270	1180
NiCrMoV10	1.2740	1050 ~ 850	670 ~ 700	240	840 ~ 870	油或 空冷	300 ~ 600	1770	1620	1470	—
60NiCrMoV12-4	1.2743	1050 ~ 850	690 ~ 700	235	840 ~ 870	油或 空冷	450 ~ 650	1670	1470	1380	1270
57NiCrMoV7-7	1.2744	1050 ~ 850	600 ~ 700	250	860 ~ 910	油或 空冷	450 ~ 650	1720	1570	1370	1310
28NiMo17	1.2747	1050 ~ 850	640 ~ 680	285	840 ~ 870	油或 空冷	400 ~ 600	1670	1570	1370	—
35NiCrMo16	1.2766	1050 ~ 850	620 ~ 660	260	820 ~ 850	油 ^{①④}	350 ~ 600	1470	1270	1080	880
X45NiCrMo4	1.2767	1050 ~ 850	610 ~ 630	260	840 ~ 870	油或 空冷	350 ~ 650	1620	1420	1270	1180
X6NiCrTi26-15	1.2779	1150 ~ 800	900 ~ 960	(830 MPa)	700 ~ 740	油或 空冷	550 ~ 700	—	—	—	—

(续)

钢 号	材料号 W-Nr.	热加工 温度 /℃	退火 温度 /℃	退火 后硬 度 ≤ HBW	淬火温度 及冷却介质		常用回 火温度 /℃	下列温度回火后硬化值 /MPa			
					温度 /℃	介质		400℃	500℃	600℃	650℃
X16CrNiSi25-20	1.2782	1150 ~ 800	—	—	1050 ~ 1100	油 ^①	—	—	—	—	—
X13NiCrSi36-16	1.2786	1150 ~ 800	—	—	1050 ~ 1100	油 ^①	—	—	—	—	—
X23CrNi17	1.2787	1100 ~ 800	670 ~ 700	—	980 ~ 1030	油	450 ~ 600	1520	1440	1050	—
60MnSi4	1.2826	1050 ~ 850	680 ~ 720	240	820 ~ 850	油	300 ~ 550	1770	1470	1080	880
145V33	1.2838	1100 ~ 900	760 ~ 780	230	860 ~ 920	水	180 ~ 360	—	—	—	—
X32CrMoCoV3-3-3	1.2885	1190 ~ 900	750 ~ 800	230	1000 ~ 1050	油 ^① 或 空冷	500 ~ 550	1630	1670	1670	1400
X15CrCoMoV10-10-5	1.2886	1150 ~ 950	720 ~ 740	320	1050 ~ 1100	油 ^①	500 ~ 550	49 ^②	53 ^②	53 ^②	49 ^②
X20CoCrWMo10-9	1.2888	1050 ~ 900	850 ~ 720	320	1100 ~ 1150	油 ^① 或 空冷	600 ~ 750	—	55 ^②	54 ^②	53 ^②
X45CoCrMoV5-5-3	1.2889	1100 ~ 850	820 ~ 850	240	1120 ~ 1150	油 ^①	580 ~ 750	—	52 ^②	52 ^②	47 ^②
X20CrMo13	1.4120	1050 ~ 850	760 ~ 780	260	980 ~ 1030	油	500 ~ 750	—	1470	1180	980

① 用油或 500℃热浴。

② 洛氏硬度值 HRC。

③ 油淬或 200℃分级淬火。

表 16-97 德国高速工具钢的热加工、热处理与硬度

钢 号	材料号 W-Nr.	热加工 温度 /℃	退火 温度 /℃	退火 硬度 HBW	淬火加热温度/℃				回火温度 /℃	回火后 硬度 ≥ HRC
					加热	一次 预热	二次 预热	最后加热		
S12-1-4-5	1.3202	1100 ~ 900	780 ~ 810	240 ~ 300	450 ~ 600	850	1050	1210 ~ 1250	550 ~ 570	65
S10-4-3-10	1.3207	1100 ~ 900	800 ~ 830	240 ~ 300	450 ~ 600	850	1050	1210 ~ 1250	550 ~ 570	66
S6-5-5-5	1.3243	1100 ~ 900	790 ~ 820	240 ~ 300	450 ~ 600	850	1050	1200 ~ 1240	550 ~ 570	64
S6-5-2S	1.3245	1100 ~ 900	790 ~ 820	240 ~ 300	450 ~ 600	850	1050	1200 ~ 1240	550 ~ 570	64
S7-4-2-5	1.3246	1100 ~ 900	770 ~ 840	240 ~ 300	450 ~ 600	850	1050	1180 ~ 1220	530 ~ 550	66
S2-10-1-8	1.3247	1050 ~ 900	770 ~ 820	240 ~ 300	450 ~ 600	850	1050	1170 ~ 1210	510 ~ 540	66
S2-9-2-8	1.3249	1100 ~ 900	790 ~ 820	235 ~ 300	450 ~ 600	850	1050	1190 ~ 1230	550 ~ 570	64

(续)

钢 号	材料号 W-Nr.	热加工 温度 /℃	退火 温度 /℃	退火 硬度 HBW	淬火加热温度/℃				回火温度 /℃	回火后 硬度 ≥ HRC
					加热	一次 预热	二次 预热	最后加热		
S18-1-2-5	1.3255	1150 ~ 900	820 ~ 850	240 ~ 300	450 ~ 600	850	1050	1260 ~ 1300	550 ~ 570	64
S18-1-2-15	1.3257	1150 ~ 900	820 ~ 850	240 ~ 300	450 ~ 600	850	1050	1260 ~ 1300	560 ~ 580	64
S18-1-2-10	1.3265	1150 ~ 900	820 ~ 850	240 ~ 300	450 ~ 600	850	1050	1260 ~ 1300	560 ~ 580	64
S12-1-4	1.3302	1100 ~ 900	780 ~ 810	240 ~ 300	450 ~ 600	850	1050	1220 ~ 1260	560 ~ 580	65
S12-1-2	1.3318	1100 ~ 900	780 ~ 810	225 ~ 280	450 ~ 600	850	1050	1230 ~ 1270	550 ~ 570	64
S3-3-2	1.3333	1100 ~ 900	760 ~ 790	225 ~ 280	450 ~ 600	850	1050	1180 ~ 1220	530 ~ 530	64
SC6-5-2S	1.3340	1050 ~ 900	770 ~ 820	240 ~ 300	450 ~ 600	850	1050	1180 ~ 1220	540 ~ 560	65
S6-5-2S	1.3341	1100 ~ 900	790 ~ 820	240 ~ 300	450 ~ 600	850	1050	1190 ~ 1230	550 ~ 570	64
SC6-5-2	1.3342	1050 ~ 900	770 ~ 820	240 ~ 300	450 ~ 600	850	1050	1180 ~ 1220	540 ~ 560	64
S6-5-2	1.3343	1100 ~ 900	790 ~ 820	240 ~ 300	450 ~ 600	850	1050	1190 ~ 1230	550 ~ 570	64
S6-5-3	1.3344	1100 ~ 900	770 ~ 820	240 ~ 300	450 ~ 600	850	1050	1200 ~ 1240	550 ~ 570	65
S2-9-1	1.3346	1100 ~ 900	790 ~ 820	225 ~ 280	450 ~ 600	850	1050	1180 ~ 1220	530 ~ 550	64
S2-9-2	1.3348	1100 ~ 900	780 ~ 810	230 ~ 280	450 ~ 600	850	1050	1190 ~ 1230	540 ~ 560	64
S18-0-1	1.3355	1150 ~ 900	820 ~ 850	240 ~ 300	450 ~ 600	850	1050	1250 ~ 1290	550 ~ 570	64

表 16-98 美国 ASTM 标准碳素工具钢的硬度与热处理规范

钢号 ASTM	退火或冷拉后硬度 HBW		热 处 理 ^①			淬火硬度 ≥ HRC
	退 火	冷 拉	碳含量(%)	淬火温度/℃	冷却介质	
W1	202	241	0.70 ~ 0.85	802	盐水	64
			0.85 ~ 0.95	802	盐水	65
			0.95 ~ 1.50	788	盐水	65
W2	202	241	0.85 ~ 0.95	802	盐水	65
			0.95 ~ 1.50	788	盐水	65
W5	202	241	1.05 ~ 1.15	802	盐水	65

① 淬火温度由华氏温度换算,未取整数。

表 16-99 美国 AISI 和 SAE 标准水淬工具钢的硬度与热处理规范

钢号 AISI/SAE	热加工温度/℃		退火温度 /℃	退火后硬度 HBW	淬火温度 /℃	淬火 介质	回火温度 /℃	回火后硬度 HRC
	始锻	终锻						
W108	980 ~ 1070	820	740 ~ 760	159 ~ 202	790 ~ 840	盐水或水	150 ~ 340	65 ~ 50
W109	980 ~ 1070	820	740 ~ 760	159 ~ 202	770 ~ 840	盐水或水	150 ~ 340	65 ~ 50
W110	980 ~ 1070	820	760 ~ 790	159 ~ 202	770 ~ 840	盐水或水	150 ~ 340	65 ~ 50
W112	980 ~ 1070	820	760 ~ 790	159 ~ 202	760 ~ 830	盐水或水	150 ~ 340	65 ~ 50
W209	980 ~ 1070	820	740 ~ 760	159 ~ 202	770 ~ 840	盐水或水	150 ~ 340	65 ~ 50
W210	980 ~ 1070	820	760 ~ 790	159 ~ 202	770 ~ 840	盐水或水	150 ~ 340	65 ~ 50
W31	980 ~ 1070	820	760 ~ 790	159 ~ 202	770 ~ 840	盐水或水	150 ~ 340	65 ~ 50

(续)

钢号 AISI/SAE	热加工温度/℃		退火温度 /℃	退火后硬度 HBW	淬火温度 /℃	淬火 介质	回火温度 /℃	回火后硬度 HRC
	始锻	终锻						
W4	980 ~ 1070 ^①	820	740 ~ 790 ^②	159 ~ 202	760 ~ 840 ^③	盐水或水	150 ~ 340	65 ~ 50
W5	980 ~ 1070 ^①	820	740 ~ 790 ^②	163 ~ 202	760 ~ 840 ^③	盐水或水	150 ~ 340	65 ~ 50
W6	980 ~ 1070 ^①	820	740 ~ 790 ^②	163 ~ 202	760 ~ 840 ^③	盐水或水	150 ~ 340	65 ~ 50
W7	980 ~ 1070 ^①	820	740 ~ 790 ^②	163 ~ 202	760 ~ 840 ^③	盐水或水	150 ~ 340	65 ~ 50

① 钢中 $w(C)0.50\% \sim 1.25\%$ 时用此温度范围; $w(C)1.25\% \sim 1.40\%$ 时用温度下限。② 钢中 $w(C)0.60\% \sim 0.90\%$ 时用 $740 \sim 760^\circ\text{C}$; $w(C)0.90\% \sim 1.40\%$ 时用 $760 \sim 790^\circ\text{C}$ 。③ 钢中 $w(C)0.60\% \sim 0.80\%$ 时用 $790 \sim 840^\circ\text{C}$; $w(C)0.85\% \sim 1.05\%$ 时用 $770 \sim 840^\circ\text{C}$; $w(C)1.10\% \sim 1.40\%$ 时用 $760 \sim 830^\circ\text{C}$ 。

表 16-100 美国 ASTM 标准合金工具钢的硬度与热处理规范

钢号 ASTM	退火或冷拉后硬度 HBW		预热温度 /℃	淬火温度/℃		保温时间 /min	淬火 介质	回火温度 /℃	回火后硬度 ≥ HRC
	退火	冷拉		盐浴炉	可控气氛炉				
H10	229	255	788	1010	1024	5 ~ 15	空冷	552	55
H11	235	262	788	996	1010	5 ~ 15	空冷	552	53
H12	235	262	788	996	1010	5 ~ 15	空冷	552	53
H13	235	262	788	996	1010	5 ~ 15	空冷	552	52
H14	235	262	788	1038	1052	5 ~ 15	空冷	552	55
H19	241	262	788	1177	1191	5 ~ 15	空冷	552	55
H21	235	262	788	1177	1191	5 ~ 15	空冷	552	52
H22	235	262	788	1177	1191	5 ~ 15	空冷	552	53
H23	255	269	816	1246	1260	5 ~ 15	油	649	42
H24	241	262	788	1204	1218	5 ~ 15	空冷	552	55
H25	235	262	788	1232	1246	5 ~ 15	空冷	552	44
H26	241	262	843	1246	1260	5 ~ 15	空冷	552	58
H41	235	262	788	1163	1177	5 ~ 15	空冷	552	60
H42	235	262	788	1191	1204	5 ~ 15	空冷	552	60
H43	235	262	788	1171	1191	5 ~ 15	空冷	552	58
A2	248	262	788	941	945	5 ~ 15	空冷	204	60
A3	229	255	788	968	982	5 ~ 15	空冷	204	63
A4	241	262	677	843	857	5 ~ 15	空冷	204	61
A6	248	262	649	829	843	5 ~ 15	空冷	204	58
A7	269	285	816	954	968	5 ~ 15	空冷	204	63
A8	241	262	788	996	1010	5 ~ 15	空冷	510	56
A9	248	262	788	996	1010	5 ~ 15	空冷	510	56
A10	269	285	649	802	816	5 ~ 15	空冷	204	59
D2	255	269	816	996	1010	10 ~ 20	空冷	204	59

(续)

钢号 ASTM	退火或冷拉后硬度 HBW		预热温度 /℃	淬火温度/℃		保温时间 /min	淬火 介质	回火温度 /℃	回火后硬度 ≥ HRC
	退火	冷拉		盐浴炉	可控气氛炉				
D3	255	269	816	954	968	10~20	油	204	61
D4	255	269	816	982	996	10~20	空冷	204	62
D5	255	269	816	996	1010	10~20	空冷	204	61
D7	262	277	816	1052	1066	10~20	空冷	204	63
O1	212	241	649	788	802	5~15	油	204	60
O2	217	241	649	788	802	5~15	油	204	59
O6	229	241		788	802	5~15	油	204	59
O7	241	255	649	857	871	5~15	油	204	62
S1	229	255	677	941	954	5~15	油	204	56
S2	217	241	677	885	899	5~15	盐水	204	58
S4	229	255	677	885	899	5~15	油	204	58
S5	229	255	677	885	899	5~15	油	204	58
S6	229	255	788	927	941	5~15	油	204	56
S7	229	255	677	941	954	5~15	空冷	204	56
F1	207	241	649	829	843	5~15	盐水	204	64
F2	235	262	649	829	843	5~15	盐水	204	64
L2	197	241	649	857	871	5~15	油	204	53
L3	201	241	649	829	843	5~15	油	204	62
L6	235	262	649	816	829	5~15	油	204	58

注：1. 淬火和回火温度由华氏温度换算，未取整数。

2. ASTM 标准中未列出 P 系列各钢号的热处理规范，仅列出各钢号退火硬度为：P2—100HBW，P3—143HBW，P4—131HBW，P5—131HBW，P6—212HBW，P20 和 P21 通常以预硬化状态供应。

3. L2 的回火后硬度 (53HRC) 是指碳含量 $w(C)$ 0.45%~0.55% 时的硬度。

表 16-101 美国 AISI, SAE 标准和 UNS 系统合金工具钢的硬度与热处理规范

钢号 AISI/ SAE	热加工温度/℃		退火温度 /℃	退火后硬度 HBW	淬火温度 /℃	淬火 介质	回火温度 /℃	回火后硬度 HRC
	始锻	终锻						
耐 冲 击 工 具 钢								
S1	1010 ~ 1120	870	790 ~ 820	183 ~ 229 ^①	900 ~ 980	油	200 ~ 650	58 ~ 40
S2	1010 ~ 1120	870	760 ~ 790	192 ~ 217	840 ~ 900	盐水或水	150 ~ 430	60 ~ 50
S3	1010 ~ 1120	870	790 ~ 820	181 ~ 212	820 ~ 870	盐水或水	150 ~ 310	59 ~ 50
S4	1010 ~ 1120	870	760 ~ 790	192 ~ 229	{ 870 ~ 930 900 ~ 950	{ 盐水或水 油 }	180 ~ 430	60 ~ 50
S5	1010 ~ 1120	870	760 ~ 790	192 ~ 229	870 ~ 930	油	180 ~ 430	60 ~ 50
S7	—	—	815 ~ 845	187 ~ 223	925 ~ 955	油或空	205 ~ 620	57 ~ 45

(续)

钢号 AISI/ SAE	热加工温度/℃		退火温度 /℃	退火后硬度 HBW	淬火温度 /℃	淬火 介质	回火温度 /℃	回火后硬度 HRC
	始锻	终锻						
油 淬 冷 作 工 具 钢								
O1	980 ~ 1070	840	760 ~ 790	183 ~ 212	790 ~ 820	油	150 ~ 260	62 ~ 57
O2	980 ~ 1050	840	740 ~ 770	183 ~ 212	760 ~ 800	油	150 ~ 260	62 ~ 57
O6	1070	820	790	< 217	790 ~ 840	油	150 ~ 320	63 ~ 58
O7	980 ~ 1090	870	790 ~ 820	192 ~ 217	{ 790 ~ 830 840 ~ 880	{ 水 油 }	160 ~ 290	64 ~ 58
空 淬 中 合 金 冷 作 工 具 钢								
A2	1010 ~ 1090	900	840 ~ 870	202 ~ 229	930 ~ 980	空气	150 ~ 540	62 ~ 57
A4	1010 ~ 1090	900	740 ~ 760	200 ~ 241	820 ~ 870	空气	150 ~ 430	62 ~ 54
A5	1010 ~ 1090	870	740 ~ 760	228 ~ 255	790 ~ 850	空气	150 ~ 430	60 ~ 54
A6	1040 ~ 1120	870	730 ~ 750	217 ~ 248	830 ~ 870	空气	150 ~ 430	60 ~ 54
A7	1050 ~ 1150	980	870 ~ 900	235 ~ 262	950 ~ 980	空气	150 ~ 540	67 ~ 57
A8	1090 ~ 1150	—	830 ~ 845	—	995 ~ 1010	空气	150 ~ 590	61 ~ 49
A9	—	—	845 ~ 870	212 ~ 248	980 ~ 1025	空	510 ~ 620	56 ~ 35
A10	—	—	765 ~ 795	235 ~ 269	790 ~ 815	空	175 ~ 425	62 ~ 55
高 碳 高 铬 冷 作 工 具 钢								
D1	1010 ~ 1090	930	870 ~ 900	207 ~ 248	970 ~ 1010	空气	200 ~ 540	61 ~ 54
D2	1010 ~ 1090	930	870 ~ 900	217 ~ 255	980 ~ 1020	空气	200 ~ 540	61 ~ 54
D3	1010 ~ 1090	930	870 ~ 900	217 ~ 255	930 ~ 980	油	200 ~ 540	61 ~ 54
D4	1010 ~ 1090	930	870 ~ 900	217 ~ 255	970 ~ 1010	空气	200 ~ 540	61 ~ 54
D5	1010 ~ 1090	930	870 ~ 900	223 ~ 255	980 ~ 1020	空气	200 ~ 540	61 ~ 54
D6	1010 ~ 1090	930	870 ~ 900	217 ~ 255	930 ~ 950	油	200 ~ 540	61 ~ 54
D7	1120 ~ 1160	980	870 ~ 900	235 ~ 262	1010 ~ 1070	空气	150 ~ 540	65 ~ 58
热 作 工 具 钢								
H10	1040 ~ 1120		870 ~ 900		1010 ~ 1040	空气或油	540 ~ 650	54 ~ 38
H11	1070 ~ 1150	900	840 ~ 900	192 ~ 229	990 ~ 1020	空气	540 ~ 650	54 ~ 38
H12	1070 ~ 1150	900	840 ~ 900	192 ~ 229	990 ~ 1020	空气	540 ~ 650	55 ~ 38
H13	1070 ~ 1150	900	840 ~ 900	192 ~ 229	990 ~ 1040	空气	540 ~ 650	53 ~ 68
H14	1070 ~ 1180	930	870 ~ 900	207 ~ 235	1010 ~ 1070	空气	590 ~ 650	47 ~ 40
H15	1040 ~ 1150	900	840 ~ 870	207 ~ 229	1150 ~ 1260	空气或油	590 ~ 650	49 ~ 36
H16	1070 ~ 1180	930	870 ~ 900	212 ~ 241	1120 ~ 1180	空气或油	570 ~ 680	60 ~ 45
H19	—	—	870 ~ 900	207 ~ 241	1095 ~ 1205	空气或油	540 ~ 705	57 ~ 40
H20	1070 ~ 1180	900	870 ~ 900	207 ~ 235	1100 ~ 1200	空气或油	590 ~ 680	54 ~ 36
H21	1070 ~ 1180	900	870 ~ 900	207 ~ 235	1100 ~ 1200	空气或油	590 ~ 680	54 ~ 36
H22	1070 ~ 1180	900	870 ~ 900	207 ~ 235	1100 ~ 1200	空气或油	590 ~ 680	52 ~ 39

缺页

表 16-102 美国 ASTM 标准高速工具钢的硬度与热处理规范

钢 号	退火或冷拉后硬度			预热温度 /℃	淬火温度/℃		回火温度 /℃	回火后硬度 ≥HRC
	HBW				盐浴炉	可控气氛炉		
	退火	冷拉	冷拉后 退 火					
钨 系 高 速 工 具 钢								
T1	255	269	262	816 ~ 871	1277	1288	552	63
T2	255	269	262	816 ~ 871	1277	1288	552	63
T4	269	285	277	816 ~ 871	1277	1288	552	63
T5	285	302	293	816 ~ 871	1277	1288	552	63
T6	302	321	311	816 ~ 871	1277	1288	552	63
T8	255	269	262	816 ~ 871	1277	1288	552	63
T15	277	293	285	16 ~ 871	1277	1288	538	65
钼 系 高 速 工 具 钢								
M1	248	262	255	732 ~ 843	1196	1207	552	64
M2 (正常 C)	248	262	255	732 ~ 843	1216	1227	552	64
M2 (高 C)	255	269	262	732 ~ 843	1204	1216	552	65
M3 Class1	255	269	262	732 ~ 843	1204	1216	552	64
M3 Class2	255	269	262	732 ~ 843	1204	1216	552	64
M4	255	269	262	732 ~ 843	1204	1216	552	64
M6	277	293	285	732 ~ 843	1188	1199	552	64
M7	255	269	262	732 ~ 843	1204	1216	552	65
M10 (正常 C)	248	262	255	732 ~ 843	1196	1207	552	63
M10 (高 C)	255	269	262	732 ~ 843	1196	1207	552	64
M30	269	285	277	732 ~ 843	1204	1216	552	64
M33	269	285	277	732 ~ 843	1204	1216	552	65
M34	269	285	277	732 ~ 843	1204	1216	552	64
M36	269	285	277	732 ~ 843	1204	1216	552	64
M41	269	285	277	732 ~ 843	1190	1202	538	66
M42	269	285	277	732 ~ 843	1177	1188	538	66
M43	269	285	277	732 ~ 843	1177	1188	538	66
M44	285	302	293	732 ~ 843	1188	1199	538	66
M46	269	285	277	732 ~ 843	1204	1216	538	66
M47	269	285	277	732 ~ 843	1190	1202	538	66
M48	311	331	321	732 ~ 843	1190	1202	538	66
M62	285	302	293	732 ~ 843	1190	1202	538	66
中 间 型 高 速 工 具 钢								
M50	248	262	255	732 ~ 843	1104	1116	538	61
M52	248	262	255	732 ~ 843	1163	1174	538	63

注：表中各项温度由华氏温度换算，未取整数。

表 16-103 美国 AISI, SAE 标准和 UNS 系统高速工具钢的硬度与热处理规范

钢 号 AISI/SAE	热加工温度/℃		退火温度 /℃	退火后 硬度 HBW	淬火温度/℃	淬火介质	回火温度 /℃	回火后 硬度 HRC
	开始	终止						
钨 系 高 速 工 具 钢								
T1	1070 ~ 1180	950	870 ~ 900	217 ~ 255	1260 ~ 1300	油, 空冷或盐浴	540 ~ 600	65 ~ 60
T2	1070 ~ 1180	950	870 ~ 900	223 ~ 255	1260 ~ 1300	油, 空冷或盐浴	540 ~ 600	66 ~ 61
T3	1070 ~ 1180	950	870 ~ 900	229 ~ 269	1230 ~ 1270	油, 空冷或盐浴	540 ~ 600	65 ~ 60
T4	1070 ~ 1180	950	870 ~ 900	228 ~ 269	1260 ~ 1300	油, 空冷或盐浴	540 ~ 600	66 ~ 62
T5	1070 ~ 1180	980	870 ~ 900	235 ~ 275	1270 ~ 1320	油, 空冷或盐浴	540 ~ 600	65 ~ 60
T6	1070 ~ 1180	980	870 ~ 900	248 ~ 293	1270 ~ 1320	油, 空冷或盐浴	540 ~ 600	65 ~ 60
T7	1070 ~ 1180	950	870 ~ 900	217 ~ 255	1260 ~ 1290	油, 空冷或盐浴	540 ~ 600	65 ~ 60
T8	1070 ~ 1180	950	870 ~ 900	228 ~ 255	1260 ~ 1300	油, 空冷或盐浴	540 ~ 600	65 ~ 60
T9	1070 ~ 1180	980	870 ~ 900	235 ~ 277	1245 ~ 1275	油, 空冷或盐浴	540 ~ 600	66 ~ 61
T15	1070 ~ 1180	980	870 ~ 900	241 ~ 277	1200 ~ 1260	油, 空冷或盐浴	540 ~ 650	68 ~ 63
钼 系 高 速 工 具 钢								
M1	1040 ~ 1150	930	820 ~ 870	207 ~ 235	1180 ~ 1220	油, 空冷或盐浴	540 ~ 600	65 ~ 60
M2	1040 ~ 1150	930	820 ~ 870	212 ~ 241	1190 ~ 1230	油, 空冷或盐浴	540 ~ 600	65 ~ 60
M3 class1	1040 ~ 1150	—	840 ~ 870	—	1190 ~ 1220	油, 空冷或盐浴	540 ~ 560	66 ~ 63
M3 class2	1060 ~ 1120	—	840 ~ 870	—	1190 ~ 1220	油或盐浴	540 ~ 560	66 ~ 63
M4	1040 ~ 1150	930	870 ~ 900	223 ~ 255	1200 ~ 1230	油, 空冷或盐浴	540 ~ 600	66 ~ 61
M6	1040 ~ 1150	930	870	248 ~ 277	1180 ~ 1205	油, 空冷或盐浴	540 ~ 600	66 ~ 61
M7	1040 ~ 1150	930	820 ~ 870	217 ~ 255	1180 ~ 1230	油, 空冷或盐浴	540 ~ 600	65 ~ 61
M8	1040 ~ 1150	930	840 ~ 870	217 ~ 241	1200 ~ 1260	油, 空冷或盐浴	540 ~ 600	65 ~ 60
M10	1040 ~ 1150	930	820 ~ 870	207 ~ 235	1180 ~ 1230	油, 空冷或盐浴	540 ~ 600	68 ~ 60
M15	1040 ~ 1150	930	870 ~ 900	241 ~ 277	1190 ~ 1230	油, 空冷或盐浴	540 ~ 600	65 ~ 63
M30	1040 ~ 1150	930	870 ~ 900	235 ~ 269	1200 ~ 1230	油, 空冷或盐浴	540 ~ 600	65 ~ 60
M33	1040 ~ 1150	930	870 ~ 900	235 ~ 269	1200 ~ 1230	油, 空冷或盐浴	540 ~ 600	65 ~ 60
M34	1040 ~ 1150	930	870 ~ 900	235 ~ 269	1200 ~ 1230	油, 空冷或盐浴	540 ~ 600	65 ~ 60
M35	1040 ~ 1150	930	870 ~ 900	235 ~ 269	1220 ~ 1245	油, 空冷或盐浴	540 ~ 600	65 ~ 60
M36	1040 ~ 1150	930	870 ~ 900	235 ~ 269	1220 ~ 1245	油, 空冷或盐浴	540 ~ 600	69 ~ 60
M42	1090 ~ 1150	—	840 ~ 870	—	1160 ~ 1180	油或盐浴	540 ~ 600	69 ~ 66
M43	1160 ~ 1180	—	880 ~ 900	—	1160 ~ 1180	油或盐浴	540 ~ 600	63 ~ 66
M50	1060 ~ 1120	—	830 ~ 850	—	1120 ~ 1140	油或盐浴	520 ~ 550	63 ~ 61
M52	1060 ~ 1120	—	830 ~ 850	—	1140 ~ 1160	油或盐浴	520 ~ 550	63 ~ 61

表 16-104 英国碳素工具钢推荐的热处理工艺与硬度

钢 号	退火温度 /℃	退火后硬度 HBW	淬火温度 /℃	冷却介质	回火温度 /℃	回火后硬度 HV
BW1A	740 ~ 790	≥ 207	770 ~ 790	水或盐水	180 ~ 350	≥ 790
BW1B	740 ~ 790	≥ 207	770 ~ 790	水或盐水	180 ~ 350	≥ 790
BW1C	740 ~ 790	≥ 207	760 ~ 780	水或盐水	180 ~ 350	≥ 790
BW2	740 ~ 790	≥ 207	780 ~ 800	水或盐水	180 ~ 350	≥ 790

注：碳素钢水淬时，通常要求低淬透性，以获得硬而薄的表面和软韧的心部。

表 16-105 英国合金工具钢推荐的热处理工艺与硬度

钢 号	退火温度 /℃	退火后硬度 HBW	预热温度 /℃	淬火温度 /℃	冷却介质	回火温度 ^① /℃	回火后硬度 HV
-----	------------	--------------	------------	------------	------	-------------------------	-------------

耐 冲 击 工 具 钢

BS1	790 ~ 820	≤ 229	—	870 ~ 950	油	200 ~ 650	≥ 600
BS2	790 ~ 820	≤ 229	—	870 ~ 900	油或水	175 ~ 425	≥ 600
BS5	790 ~ 820	≤ 229	—	870 ~ 920	油或水	175 ~ 425	≥ 655

冷 作 工 具 钢

BO1	760 ~ 780	≤ 229	—	780 ~ 820	油	150 ~ 300	≥ 735
BO2	760 ~ 780	≤ 229	—	760 ~ 780	油	150 ~ 300	≥ 735
BA2	850 ~ 870	≤ 241	800	950 ~ 980	空冷	150 ~ 550	≥ 735
BA6	730 ~ 750	≤ 241	650	830 ~ 850	空冷	150 ~ 250	≥ 735
BD2	850 ~ 870	≤ 255	800	980 ~ 1030	空或油	150 ~ 220	≥ 735
					盐浴	450 ~ 550	
BD2A	850 ~ 870	≤ 255	800	980 ~ 1030	空或油	150 ~ 220	≥ 763
					盐浴	450 ~ 550	
BD3	850 ~ 870	≤ 255	800	950 ~ 1000	空或油	150 ~ 220	≥ 763
					盐浴	450 ~ 550	
BF1	780 ~ 800	≤ 207	—	780 ~ 800	油或水	200 ~ 250	≥ 760
BL1	780 ~ 820	≤ 229	—	800 ~ 850	油或水	150 ~ 300	≥ 735
BL3	790 ~ 810	≤ 207	—	790 ~ 840	油或水	150 ~ 350	≥ 760

热 作 工 具 钢

BH10	850 ~ 870	≤ 229	800	1000 ~ 1060	空或油	530 ~ 650	—
BH10A	850 ~ 870	≤ 241	800	1000 ~ 1060	空或油	530 ~ 650	—
BH11	850 ~ 870	≤ 229	800	1000 ~ 1030	空或油	530 ~ 650	—
BH12	850 ~ 870	≤ 229	800	1000 ~ 1030	空或油	530 ~ 650	—
BH13	850 ~ 870	≤ 229	800	1000 ~ 1030	空或油	530 ~ 650	—
BH19	850 ~ 870	≤ 248	800	1150 ~ 1200	空或油	530 ~ 650	—
BH21	870 ~ 890	≤ 235	800	1100 ~ 1180	空或油	560 ~ 675	—
BH21A	870 ~ 890	≤ 255	800	1100 ~ 1170	空或油	560 ~ 675	—
BH26	870 ~ 890	≤ 241	850	1180 ~ 1260	空或油	550 ~ 570	≥ 763

(续)

钢 号	退火温度 /℃	退火后硬度 HBW	预热温度 /℃	淬火温度 /℃	冷却介质	回火温度 ^① /℃	回火后硬度 HV
热 锻 模 具 钢							
BH224/5	850 ~ 870	—	650	820 ~ 840	油或水	520 ~ 660	A 401 ~ 429 B 363 ~ 388 B 331 ~ 352 D 302 ~ 321 E 269 ~ 293
塑 料 模 具 钢							
BP20	—	②	—	850 ~ 880	油	180 ~ 650	②
BP30	640 ~ 660	②	—	810 ~ 830	空或油	180 ~ 650	②

① 要求高硬度时, 选用较低的回火温度; 若要求高韧性时, 选用较高的回火温度。

② BP20 和 BP30 可提供较宽范围的硬度。

表 16-106 英国高速工具钢推荐的热处理工艺与硬度

钢 号	退火温度 /℃	退火后硬度 HBW	预热温度 /℃	淬火温度 ^{①②} /℃	冷却介质	回火温度 ^③ /℃	淬火回火后 硬度 HV
W 系 高 速 钢							
BT1	870 ~ 890	≤ 255	850	1270 ~ 1290	油或空冷; 或者先在 500 ~ 560℃ 的盐 浴中冷却, 再 进行空冷	550 ~ 570	≥ 823
BT2	870 ~ 890	≤ 255	850	1270 ~ 1290		550 ~ 570	≥ 823
BT4	880 ~ 900	≤ 277	850	1280 ~ 1300		550 ~ 570	≥ 849
BT5	880 ~ 900	≤ 290	850	1290 ~ 1310		550 ~ 570	≥ 869
BT6	880 ~ 900	≤ 302	850	1290 ~ 1310		550 ~ 570	≥ 869
BT15	870 ~ 890	≤ 290	850	1230 ~ 1250		550 ~ 570	≥ 890
BT20	870 ~ 890	≤ 255	850	1270 ~ 1290		550 ~ 570	≥ 823
BT21	850 ~ 870	≤ 255	850	1270 ~ 1290		550 ~ 570	≥ 798
BT42	850 ~ 870	≤ 277	850	1220 ~ 1240		550 ~ 570	≥ 912
W-Mo 系高速钢							
BM1	850 ~ 870	≤ 241	850	1190 ~ 1210	油或空冷; 或者先在 500 ~ 560℃ 的盐 浴中冷却, 再 进行空冷	530 ~ 550	≥ 823
BM2	850 ~ 870	≤ 248	850	1210 ~ 1230		550 ~ 570	≥ 836
BM4	850 ~ 870	≤ 255	850	1200 ~ 1220		540 ~ 560	≥ 849
BM15	870 ~ 900	≤ 277	850	1210 ~ 1230		540 ~ 560	≥ 869
BM34	870 ~ 900	≤ 269	850	1215 ~ 1235		530 ~ 550	≥ 869
BM35	870 ~ 900	≤ 269	850	1215 ~ 1235		530 ~ 550	≥ 869
BM42	870 ~ 900	≤ 269	850	1180 ~ 1200		520 ~ 540	≥ 897

① 高速钢推荐的淬火温度系在盐浴炉中加热的温度; 如在箱式炉中加热, 则淬火温度应提高 20℃ 左右。

② 所推荐的淬火温度适用于完全淬火。对于特殊要求, 如要求高韧性时, 则淬火温度应稍低些; 如要求高硬度时, 则淬火温度稍高些为宜。

③ 除含钴钢进行 3 次回火外, 一般均推荐 2 次回火。每次热处理后, 允许试样冷却至室温。

表 16-107 法国碳素工具钢的技术条件

钢 号	退火硬度 ^① ≤ HBW	淬火		晶粒度 ^① /级	淬透深度 ^② /mm	淬火硬度 ^③ ≥ HRC
		温度/℃	冷却介质			
C70E2U	207	805	水	7	4	61
C80E2U	207	795	水	7	4	62
C90E2U	207	795	水	7	4	63
C105E2U	207	795	水	7	4	64
C105E2UV1	207	785	水	8	4	64
C120E3U	207	785	水	6	5	64
C140E3U	207	775	水	6	5	64
C120E3UCr4	217	785	水	6	6	64
C140E3UCr4	217	775	水	6	6	64
C38E4U	(217)	825	水	6	—	50
C42E4U	(217)	815	水	6	—	52
C48E4U	(217)	815	水	6	—	56
C55E4U	(217)	805	水	6	—	58
C65E4U	(217)	795	水	6	—	60

① 按 NFA04-102 标准进行测定。

② 按 NF A04-302 标准进行测定。

③ 按 NF A03-153 标准进行测定，系水淬后未回火的硬度值。

④ 完全退火后的硬度；括号内是软化退火后的硬度。

表 16-108 法国碳素工具钢的热加工与热处理

钢 号	热加工温度 /℃	正火温度 /℃	退火温度/℃			淬火温度/℃	
			软化退火	消除应力退火	完全退火	水淬	油淬
C70E2U	1000/800	—	680 ~ 710	600 ~ 650	750 ~ 800	790 ~ 820	810 ~ 840
C80E2U	1000/800	—	680 ~ 710	600 ~ 650	750 ~ 800	780 ~ 810	810 ~ 840
C90E2U	1000/800	—	680 ~ 710	600 ~ 650	750 ~ 800	780 ~ 810	800 ~ 830
C105E2U	1000/800	—	680 ~ 710	600 ~ 650	750 ~ 800	770 ~ 800	790 ~ 820
C105E2UV1	1000/800	—	680 ~ 710	600 ~ 650	750 ~ 800	770 ~ 800	790 ~ 820
C120E3U	1000/800	—	680 ~ 710	600 ~ 650	750 ~ 800	770 ~ 800	790 ~ 820
C140E3U	1000/800	—	680 ~ 710	600 ~ 650	750 ~ 800	760 ~ 790	770 ~ 820
C120E3UCr4	1000/800	—	680 ~ 710	600 ~ 650	750 ~ 800	770 ~ 800	790 ~ 820
C140E3UCr4	1000/800	—	680 ~ 710	600 ~ 650	750 ~ 800	760 ~ 790	770 ~ 820
C38E4U	1050/800	900	680	—	—	820 ~ 850	—
C42E4U	1050/800	870	680	600 ~ 650	—	800 ~ 830	—
C48E4U	1050/800	850	680	600 ~ 650	—	800 ~ 830	820 ~ 850
C55E4U	1100/800	820	680	600 ~ 650	—	790 ~ 820	810 ~ 840
C65E4U	1100/800	800	680	600 ~ 650	750 ~ 800	780 ~ 810	800 ~ 830

表 16-109 法国冷作合金工具钢的技术条件

钢 号	退火硬度 ≤ HBW	淬 火		回火温度 ^② /℃	硬度 ≥ HRC
		淬火温度/℃	冷却介质		
50CrMoV13	223 ^①	—	—	—	—
70MoCrMo8	248 ^①	—	—	—	—
90MnV8	223	780	油	180	59
90MnWCrV5	228	780	油	180	59
100V2	223	800	水	180	60
100Cr2	223	800	水	180	60
100Cr6	223	850	油	180	60
100CrMn6	223	830	油	180	60
105WCr5	228	810	水	180	61
130Cr3	223	800	水	180	61
X100CrMoV5	241	980	空冷	180	61
X160CrMoV12	255	1020	空冷	180	61
X160CrCoMoV12-3	255	1000	空冷	180	61
X200Cr12	248	980	油	180	61
X200CrMo12	255	1000	空冷	180	61
X210CrW12-1	255	970	油	180	62
35NiCr15	255	850	空冷	180	50
35CrMnMo7	300	—	—	—	—
40CrMnMo8	300	—	—	—	—
42CrMo4	217	850	油	180	50
45SiCrMo6	248	880	油	180	54
45WCrV8	228	900	油	180	58
46Si7	241 ^①	880	水	180	51
51Si7	248 ^①	880	水	180	52
60Si8	248	855	油	180	56
X20Cr13	223	1010	油	180	45
X33Cr13	235	1010	油	180	49
X38CrMo16-1	285	1100	油	180	49
X40Cr14	241	1000	空冷	180	52
X44Cr14	255	1010	油	180	52
X54Cr14	255	1030	油	180	54
X100CrMo17	255	1030	空冷	180	52
X1CrNiMoAl12-9	300 ^①	—	—	—	—
X2NiCoMoTi18-8-5	340 ^①	—	—	—	—

① 为软化退火后硬度，其余为完全退火后硬度。

② 回火保温 1h。

表 16-110 法国冷作合金工具钢的热加工与热处理

钢 号	热加工温度 /℃	完全退火温度 /℃	淬火	
			淬火温度/℃	冷却介质 ^②
90MnV8	1100/800	750 ~ 780	760 ~ 800	油
90MnWCrV5	1100/850	750 ~ 780	760 ~ 800	油
100V2	1050/850	770 ~ 800	780 ~ 820	水
100Cr2	1100/850	770 ~ 800	780 ~ 820	水
100Cr6	1100/850	780 ~ 820	820 ~ 860	油
100CrMn6	1100/850	780 ~ 820	810 ~ 850	油
105WCr5	1100/800	780 ~ 820	780 ~ 820	水
130Cr3	1000/800	770 ~ 800	780 ~ 820	水
X100CrMoV5	1100/900	850 ~ 880	950 ~ 990	空冷/油/盐浴
X160CrMoV12	1100/900	850 ~ 880	1000 ~ 1040	空冷/油/盐浴
X160CrCoMoV12-3	1100/900	850 ~ 880	980 ~ 1020	空冷/油/盐浴
X200Cr12	1100/900	850 ~ 880	960 ~ 1000	油/盐浴
X200CrMo12	1100/900	850 ~ 880	980 ~ 1020	空冷/油/盐浴
X210CrW12-1	1000/850	850 ~ 880	960 ~ 1000	空冷/油/盐浴
35NiCr15	—	630 ~ 670 ^①	830 ~ 870	空冷/油
42CrMo4	1050/850	680 ~ 720	830 ~ 870	油
45SiCrMo6	—	650 ~ 700 ^①	860 ~ 900	油
45WCrV8	1050/850	780 ~ 820	880 ~ 920	油
46Si7	1050/850	650 ~ 700 ^①	860 ~ 900	水
51Si7	1050/850	650 ~ 700 ^①	860 ~ 900	水
60Si8	1050/850	650 ~ 700 ^①	860 ~ 900	油
X20Cr13	1100/800	780 ~ 820	950 ~ 1020	油
X33Cr13	1100/800	780 ~ 820	950 ~ 1020	油
X38CrMo16-1	1100/750	820 ~ 860	990 ~ 1030	油
X40Cr14	1150/800	780 ~ 820	950 ~ 1020	油
X44Cr14	—	780 ~ 820	950 ~ 1020	油
X54Cr14	—	780 ~ 820	1000 ~ 1050	油
X100CrMo17	1100/800	870 ~ 900	1010 ~ 1050	空冷/油/盐浴

① 为软化退火温度。

② 盐浴温度 550℃

表 16-111 法国热作合金工具钢的技术条件

钢 号	退火硬度 ≤ HBW	淬火		回火温度 ^② /℃	硬度 ≥ HRC
		淬火温度/℃	冷却介质		
35CrMo8	300	—	—	—	—
35NiCrMoV8	241	850	油	500	42
40CrMoV13	229	900	油	500	45

(续)

钢 号	退火硬度 ≤ HBW	淬火		回火温度 ^② /℃	硬度 ≥ HRC
		淬火温度/℃	冷却介质		
40NiCrMo16	277	850	空冷	500	41
40NiCrMoV16	277	850	油	500	40
45CrMoV6	229	1025	油	500	47
55CrNiMoV4	248	850	油	500	43
55NiCrMoV7	248	850	油	500	43
20MoNi34-13	350	—	—	—	—
32CrMoV12-28	229	1040	油	550	47
X35CrWMoV5	229	1020	空冷	550	50
X38CrMoV5	229	1020	空冷	550	48
X38CrMoV5-3	240	1010	空冷	550	48
X40CrMoV5	229	1020	空冷	550	49
X30WCrV9	241	1150	油	600	48
X32WCrV5	235	1060	油	600	46
X56CrMoWV4	245	1160	盐浴 ^①	2 × 550	58
X80MoCrV42-16	241	1120	盐浴 ^①	600	54
X15CrNiSi25-20	200	—	—	—	—
X15NiCrSi37-18	200	—	—	—	—
X20Cr13	223	1010	油	550	38
X21CrNi17	269	1000	油	550	39

① 550℃盐浴炉。

② 回火保温 1h。

表 16-112 法国热作合金工具钢的热加工与热处理

钢 号	热加工温度 /℃	完全退火温度 /℃	淬火	
			淬火温度/℃	冷却介质 ^②
35CrMo8	1050/850	—	—	—
35NiCrMoV8	1050/850	630 ~ 670 ^①	850 ~ 880	空冷油
40CrMoV13	1050/850	740 ~ 780	880 ~ 910	油
40NiCrMo16	1050/850	630 ~ 670 ^①	830 ~ 880	空冷油
40NiCrMoV16	—	630 ~ 670 ^①	830 ~ 880	空冷油
45CrMoV6	1175/800	800 ~ 840	1000 ~ 1050	油
55CrNiMoV4	1050/850	740 ~ 780	850 ~ 880	油
55NiCrMoV7	1100/850	740 ~ 780	850 ~ 880	油
32CrMoV12-28	1050/900	870 ~ 900	1020 ~ 1070	空冷/油/盐浴
X35CrWMoV5	1150/900	850 ~ 880	1000 ~ 1050	空冷/油/盐浴
X35CrMoV5	1150/900	850 ~ 880	980 ~ 1020	空冷/油/盐浴
X38CrMoV5-3	1050/850	850 ~ 880	980 ~ 1020	空冷/油/盐浴
X40CrMoV5	1100/900	850 ~ 880	980 ~ 1020	空冷/油/盐浴

(续)

钢 号	热加工温度 /℃	完全退火温度 /℃	淬火	
			淬火温度/℃	冷却介质 ^②
X30WCrV9	1150/900	870 ~ 900	1150 ~ 1200	油/盐浴
X32WCrV5	1150/950	870 ~ 900	1040 ~ 1100	空冷/油/盐浴
X56CrMoWV4	—	870 ~ 900	1140 ~ 1180	空冷/油/盐浴
X80MoCrV42-16	—	880 ~ 920	1080 ~ 1120	空冷/盐浴
X15CrNiSi25-20	1150/800	—	1070 ~ 1150	水
X15NiCrSi37-18	1150/800	—	1070 ~ 1150	水
X20Cr13	1100/800	780 ~ 820	950 ~ 1020	油
X21CrNi17	1100/800	850 ~ 880	950 ~ 1020	油

① 为软化退火温度。

② 盐浴温度 550℃。

表 16-113 法国高速工具钢的技术条件

钢 号	退火硬度 ≤ HBW	淬 火		回火 温度 ^① /℃	硬度 ≥ HRC
		淬火温度 /℃	淬火介质 ^②		
HS6-5-4-2	250	1200	盐浴	550 × 2	60
HS18-0-1	270	1240	盐浴	550 × 2	63
HS6-5-2	260	1220	盐浴	550 × 2	64
HS6-5-2HC	270	1200	盐浴	550 × 2	64
HS2-9-1	260	1200	盐浴	550 × 2	64
HS2-9-2	265	1200	盐浴	550 × 2	64
HS6-5-3	275	1200	盐浴	550 × 3	65
HS6-5-4	275	1210	盐浴	550 × 3	65
HS18-1-1-5	275	1250	盐浴	550 × 3	64
HS18-0-2-9	295	1250	盐浴	550 × 3	64
HS6-5-2-5	270	1220	盐浴	550 × 3	64
HS6-5-2-5HC	275	1200	盐浴	550 × 3	64
HS7-4-2-5	280	1200	盐浴	550 × 3	66
HS2-9-1-8	280	1180	盐浴	520 × 4	66
HS10-4-3-10	295	1220	盐浴	550 × 3	66
HS7-6-3-12	295	1220	盐浴	550 × 3	66
HS12-1-5-5	295	1240	盐浴	550 × 3	66

① 回火保温 1h；乘号“×”后的数字表示回火次数。

② 盐浴温度 550℃。

表 16-114 法国高速工具钢的热加工与热处理

钢 号	热加工温度 /℃	退火温度 /℃	淬 火	
			淬火温度/℃	冷却介质
HS6-5-4-2	1120/900	850 ~ 870	1180 ~ 1220	空/油/盐浴
HS18-0-1	1120/950	870 ~ 900	1220 ~ 1260	空/油/盐浴
HS6-5-2	1100/900	850 ~ 870	1200 ~ 1230	空/油/盐浴
HS6-5-2HC	1050/900	850 ~ 870	1180 ~ 1220	空/油/盐浴
HS2-9-1	1100/900	850 ~ 870	1180 ~ 1210	空/油/盐浴
HS2-9-2	1100/900	850 ~ 870	1180 ~ 1210	空/油/盐浴
HS6-5-3	1100/900	850 ~ 870	1180 ~ 1220	空/油/盐浴
HS6-5-4	1100/900	860 ~ 880	1190 ~ 1230	空/油/盐浴
HS18-1-1-5	1120/980	870 ~ 900	1230 ~ 1270	空/油/盐浴
HS18-0-2-9	1150/980	880 ~ 910	1230 ~ 1270	空/油/盐浴
HS6-5-2-5	1100/900	860 ~ 880	1200 ~ 1240	空/油/盐浴
HS6-5-2-5HC	1100/900	860 ~ 880	1180 ~ 1220	空/油/盐浴
HS7-4-2-5	1100/900	860 ~ 880	1180 ~ 1220	空/油/盐浴
HS2-9-1-8	1050/900	850 ~ 870	1170 ~ 1200	空/油/盐浴
HS10-4-3-10	1100/900	860 ~ 880	1200 ~ 1240	空/油/盐浴
HS7-6-3-12	—	860 ~ 880	1200 ~ 1240	空/油/盐浴
HS12-1-5-5	1130/980	870 ~ 900	1220 ~ 1260	空/油/盐浴

表 16-115 瑞典碳素工具钢的热加工、热处理规范与硬度

钢号 SS ₁₄	热加工温度 /℃	退火温度 /℃	退火后硬度 /℃	淬火温度 /℃	淬火介质	回火温度 /℃	淬回火后硬度 HRC
1770	1000 ~ 750	750	≤ 200	800 ~ 820	水	140 ~ 200	62 ~ 56
1778	1000 ~ 750	750	≤ 195	770 ~ 800	热盐水	140 ~ 200	62 ~ 56
1880	950 ~ 750	750	≤ 195	770 ~ 800	热盐水	180 ~ 260	62 ~ 58
1885	950 ~ 750	750	≤ 195	770 ~ 800	热盐水	180 ~ 260	62 ~ 58

表 16-116 瑞典合金工具钢的热加工、热处理规范与硬度

钢号 SS ₁₄	热加工温度 /℃	退火温度 /℃	退火后硬度 HBW	淬火温度 /℃	冷却介质	回火温度 /℃	回火后硬度 HRC
2092	1000 ~ 800	800	< 240	840 ~ 870	油	350 ~ 400	58 ~ 56
2140	1000 ~ 800	760	< 220	790 ~ 830	油	150 ~ 260	62 ~ 58
2242	1070 ~ 900	840 ~ 900	192 ~ 229	990 ~ 1040	空冷	540 ~ 650	53 ~ 38
2260	1050 ~ 850	840	< 240	950 ~ 980	油/空冷	150 ~ 250	63 ~ 60
2310	1050 ~ 900	850	< 260	980 ~ 1020	油/空冷	200 ~ 540	61 ~ 54
2312	1050 ~ 900	850	< 280	940 ~ 980	油/空冷	200 ~ 500	63 ~ 59
2514	1050 ~ 850	620 ~ 650	< 200	780 ~ 800	油	150 ~ 180	62 ~ 60

(续)

钢号 SS ₁₄	热加工温度 /℃	退火温度 /℃	退火后硬度 HBW	淬火温度 /℃	冷却介质	回火温度 /℃	回火后硬度 HRC
2550	1050 ~ 800	760	< 260	I、790 ~ 820 II、830 ~ 850	油 空冷	100 ~ 600	60 ~ 35
2700	950 ~ 750	760	< 210	770 ~ 800	热盐水	—	—
2705	950 ~ 750	760	< 210	780 ~ 820	热盐水	—	—
2710	1000 ~ 800	710 ~ 760	< 245	I、880 ~ 920 II、860 ~ 900	油 水	—	—
2730	1100 ~ 850	740 ~ 780	≤ 240	1100 ~ 1150	油/热盐水	100 ~ 450	47 ~ 46
2900	1050 ~ 850	730 ~ 760	≤ 230	780 ~ 820	水冷	180 ~ 280	65
2940	—	—	≤ 229	(淬火后硬度 245 ~ 290HBW) (渗氮工具钢)			

表 16-117 瑞典高速工具钢的热处理规范与硬度

钢 号 SS ₁₄	热加工温度 /℃	退火温度 /℃	退火后硬度 HBW	淬火温度 /℃	冷却介质	回火温度 /℃	回火后硬度 HRC
2722	1100 ~ 900	790 ~ 820	225 ~ 280	1200 ~ 1240	油、空	540 ~ 560	≥ 64
2723	1100 ~ 900	790 ~ 820	240 ~ 300	1210 ~ 1250	油、空	550 ~ 570	≥ 64
2724	1150 ~ 900	830 ~ 870		1200 ~ 1240	油、空	550 ~ 570	≥ 64
2736	1100 ~ 900	800 ~ 830	240 ~ 300	1210 ~ 1250	油、空	550 ~ 570	≥ 65
2750	1150 ~ 900	850	240 ~ 300	1250 ~ 1290	油、空	540 ~ 600	64 ~ 60
2752	1150 ~ 900	850	< 290	1250 ~ 1280	油、空		
2754	1100 ~ 900	820 ~ 850	240 ~ 300	1260 ~ 1300	油、空	560 ~ 580	≥ 64
2756	1150 ~ 900	820 ~ 850	240 ~ 300	1260 ~ 1300	油、空	560 ~ 580	≥ 64
2782	1100 ~ 900	820 ~ 850	240 ~ 300	1250 ~ 1290	油、空	550 ~ 570	≥ 64

表 16-118 瑞典 ASSAB 高速工具钢的热加工、热处理规范与硬度

钢 号	热加工温度 /℃	退火温度 /℃	退火后硬度 HBW	淬火温度 /℃	冷却介质	回火温度 /℃	回火后硬度 HRC
HSP-6	1100 ~ 900	830 ~ 870	—	1270 ~ 1290	油、空	—	—
HSP-11	1150 ~ 900	830 ~ 870	230 ~ 260	1260 ~ 1280	油、空	540 ~ 570	65 ~ 64
HSP-15	1150 ~ 900	850 ~ 870	< 300	1200 ~ 1250	油、空	500 ~ 560	~ 68
HSP-16	1100 ~ 900	850 ~ 870	240 ~ 270	1200 ~ 1240	油、空	550 ~ 560	67.5 ~ 66.5
HSP-17	1100 ~ 900	850 ~ 870	—	1200 ~ 1240	油、空	560 ~ 580	70 ~ 68.5
HSP-41	1100 ~ 900	830 ~ 870	220 ~ 250	1200 ~ 1250	油、空	550 ~ 570	65 ~ 62
HSP-42	1100 ~ 900	840 ~ 870	220 ~ 250	1200 ~ 1240	油、空	550 ~ 570	65 ~ 63

表 16-119 韩国碳素工具钢的热加工、热处理规范与硬度

钢 号	热加工温度/℃		退火温度 /℃	退火后硬度 HBW	淬火温度 /℃	淬火 介质	回火温度 /℃	淬火回火后 硬度 HRC
	始锻	终锻						
STC1	1000 ~ 1050	850	750 ~ 780	< 217	760 ~ 820	水	150 ~ 200	> 63
STC2	1000 ~ 1050	850	750 ~ 780	< 212	760 ~ 820	水	150 ~ 200	> 63
STC3	1000 ~ 1050	850	750 ~ 780	< 212	760 ~ 820	水	150 ~ 200	> 63
STC4	1050 ~ 1110	850	740 ~ 760	< 207	760 ~ 820	水	150 ~ 200	> 61
STC5	1050 ~ 1100	850	730 ~ 760	< 207	760 ~ 820	水	150 ~ 200	> 59
STC6	1050 ~ 1100	850	730 ~ 760	< 201	760 ~ 820	水	150 ~ 200	> 57
STC7	1050 ~ 1100	850	730 ~ 760	< 201	760 ~ 820	水	150 ~ 200	> 56

注：各钢种回火冷却均空冷。

表 16-120 韩国合金工具钢的热加工、热处理规范与硬度

钢 号	热加工温度/℃		退火温度 /℃	退火后硬度 HBW	淬火温度 /℃	淬火 介质	回火温度 /℃	淬回火后 硬度 HRC
	始锻	终锻						
刀具用钢								
STS11	1050	800	780 ~ 850	< 241	760 ~ 810	水	150 ~ 200	> 62
STS2	1050	850	750 ~ 800	< 217	830 ~ 880	油	150 ~ 200	> 61
STS21	1050	850	750 ~ 800	< 217	770 ~ 820	水	150 ~ 200	> 61
STS5	1050	850	750 ~ 800	< 207	800 ~ 850	油	400 ~ 450	> 45
STS51	1050	850	750 ~ 800	< 207	800 ~ 850	油	400 ~ 450	> 45
STS7	1050	850	750 ~ 800	< 217	830 ~ 880	油	150 ~ 200	> 62
STS8	1050	850	750 ~ 800	< 217	780 ~ 820	水	100 ~ 150	> 63
耐冲击工具用钢								
STS4	1050	850	740 ~ 780	< 201	780 ~ 820	水	150 ~ 200	> 56
STS41	1050	850	760 ~ 820	< 217	850 ~ 900	油	150 ~ 200	> 53
STS43	1020	800	750 ~ 800	< 217	770 ~ 820	水	150 ~ 200	> 63
STS44	1050	800	730 ~ 780	< 207	760 ~ 820	水	150 ~ 200	> 60
冷作模具钢								
STS3	1000	800	750 ~ 800	< 217	800 ~ 850	油	150 ~ 200	> 60
STS31	1000	800	750 ~ 800	< 217	800 ~ 850	油	150 ~ 200	> 61
STS93	—	—	750 ~ 780	< 217	790 ~ 850	油	150 ~ 200	> 63
STS94	—	—	740 ~ 760	< 212	790 ~ 850	油	150 ~ 200	> 61
STS95	—	—	730 ~ 760	< 212	790 ~ 850	油	150 ~ 200	> 59
STD1	1000	800	830 ~ 880	< 269	930 ~ 980	空	150 ~ 200	> 61
STD11	1000	800	830 ~ 880	< 255	1000 ~ 1050	空	150 ~ 200	> 58
STD12	1060	900	830 ~ 880	< 255	930 ~ 980	空	150 ~ 200	> 61
热作模具钢								
STD4	1100	900	800 ~ 850	< 235	1050 ~ 1100	空	600 ~ 650	< 50
STD5	1100	900	800 ~ 850	< 235	1050 ~ 1100	空	600 ~ 650	< 50

(续)

钢 号	热加工温度/℃		退火温度 /℃	退火后硬度 HBW	淬火温度 /℃	淬火 介质	回火温度 /℃	淬回火后 硬度 HRC
	始锻	终锻						
热作模具钢								
STD6	1100	900	820 ~ 870	< 229	1000 ~ 1050	空	550 ~ 600	< 53
STD61	1100	900	820 ~ 870	< 229	1000 ~ 1050	空	550 ~ 600	< 53
STD62	—	—	820 ~ 870	< 229	1000 ~ 1050	空	550 ~ 600	< 53
STF3	1050	850	760 ~ 810	< 235	—	—	—	—
STF4	1050	850	740 ~ 800	< 241	—	—	—	—
STF7	—	—	820 ~ 870	< 229	1000 ~ 1050	空	550 ~ 600	< 53
STF8	—	—	820 ~ 870	< 241	1070 ~ 1170	油	600 ~ 700	< 55

表 16-121 韩国高速工具钢的热加工、热处理规范与硬度

钢 号	热加工温度/℃		退火温度 /℃	退火后硬度 HBW	淬火温度 /℃	淬火 介质	回火温度 /℃	淬火回火后 硬度 HRC
	开始	终止						
钨系高速工具钢								
SKH2	1150	950	820 ~ 880	< 248	1250 ~ 1290	油	550 ~ 580	> 62
SKH3	1250	950	840 ~ 900	< 262	1260 ~ 1300	油	550 ~ 580	> 63
SKH4	1200	950	850 ~ 910	< 285	1260 ~ 1300	油	550 ~ 580	> 64
SKH10	1150	950	820 ~ 900	< 285	1210 ~ 1250	油	550 ~ 580	> 64
钼钨系高速工具钢								
SKH51	1150	950	800 ~ 880	< 255	1200 ~ 1240	油	540 ~ 570	> 63
SKH52	1150	950	800 ~ 880	< 269	1200 ~ 1240	油	540 ~ 570	> 63
SKH53	1150	950	800 ~ 880	< 269	1200 ~ 1240	油	540 ~ 570	> 64
SKH54	1150	950	800 ~ 880	< 269	1190 ~ 1230	油	540 ~ 570	> 64
SKH55	1180	950	800 ~ 880	< 277	1200 ~ 1240	油	540 ~ 580	> 64
SKH56	1180	950	800 ~ 880	< 285	1200 ~ 1240	油	540 ~ 580	> 64
SKH57	1180	950	800 ~ 880	< 293	1210 ~ 1250	油	550 ~ 580	> 65
SKH58	—	—	800 ~ 880	< 269	1180 ~ 1220	油	540 ~ 570	> 64
SKH59	—	—	800 ~ 880	< 277	1170 ~ 1210	油	520 ~ 580	> 65

表 16-122 俄罗斯碳素工具钢的热处理与硬度

钢 号	退火温度 /℃	退火后硬度 ≤ HBW	淬火温度 /℃	冷却介质	淬火后硬度 ≥ HRC	回火温度 /℃	回火后硬度 HRC
Y7 Y7A	740 ~ 760	187	800 ~ 820	水	62	160 ~ 200	63 ~ 60
						200 ~ 300	60 ~ 54
						300 ~ 400	54 ~ 43
						400 ~ 500	43 ~ 35
						500 ~ 600	35 ~ 27

(续)

钢 号	退火温度 /℃	退火后硬度 ≤ HBW	淬火温度 /℃	冷却介质	淬火后硬度 ≥ HRC	回火温度 /℃	回火后硬度 HRC
Y8 Y8A Y8ΓA	740 ~ 760	187	780 ~ 800	水	62	160 ~ 200 200 ~ 300 300 ~ 400 400 ~ 500 500 ~ 600	64 ~ 60 60 ~ 55 55 ~ 45 45 ~ 35 35 ~ 27
Y9 Y9A	740 ~ 760	192	760 ~ 780	水	62	160 ~ 200 200 ~ 300 300 ~ 400 400 ~ 500 500 ~ 600	64 ~ 62 62 ~ 56 56 ~ 46 46 ~ 37 37 ~ 28
Y10 Y10A	750 ~ 770	207	770 ~ 800	水	63	160 ~ 200 200 ~ 300 300 ~ 400 400 ~ 500	64 ~ 62 62 ~ 56 56 ~ 47 47 ~ 38
Y11 Y11A	750 ~ 770	212	770 ~ 800	水	63	160 ~ 200 200 ~ 300 300 ~ 400 400 ~ 500	65 ~ 62 62 ~ 57 57 ~ 49 49 ~ 38
Y12 Y12A Y13 Y13A	750 ~ 770	212	760 ~ 790	水	63	160 ~ 200	65 ~ 62

注：1. 退水冷却速度为：(20 ~ 50)℃/h，至 550℃ 以下空冷。

2. 工具的直径或厚度小于 8mm 的，可在油或煤油中淬火。

3. 为了消除冷作硬化和加工的内应力，可采用 650 ~ 700℃ 高温回火。

表 16-123 俄罗斯合金工具钢的热处理与硬度

类别	钢 号	退火温度 /℃	退火后硬度 HBW	淬火温度 /℃	冷却 介质	淬火后硬度 HRC	回火温度 /℃	回火后硬度 HRC
量 具 刃 具 用 钢	8XΦ	800 ~ 820	207 ~ 170	830 ~ 860 810 ~ 830	油 水	≥ 64	200 ~ 220	64 ~ 62
	9XΦ 9XΦM	770 ~ 780	207 ~ 170	850 ~ 880 820 ~ 840	油 水	≥ 62	200 ~ 400	60 ~ 50
	11X	750 ~ 770	217 ~ 179	810 ~ 830	油	≥ 62		

(续)

类别	钢 号	退火温度 /℃	退火后硬度 HBW	淬火温度 /℃	冷却 介质	淬火后硬度 HRC	回火温度 /℃	回火后硬度 HRC
量 具 刃 具 用 钢	13X	750 ~ 770	241 ~ 187	780 ~ 810	水	≥ 64	100 ~ 200 150 ~ 170	66 ~ 64 62 ~ 60
	B2Φ	750 ~ 770	≤ 255	800 ~ 820	水	62 ~ 64	150 ~ 180	61 ~ 59
	9X1	780 ~ 800	217 ~ 179	820 ~ 850	油	62 ~ 64		
	X	780 ~ 800	229 ~ 187	830 ~ 860	油	65 ~ 62	150 ~ 200 200 ~ 300 300 ~ 400 400 ~ 500 500 ~ 550	64 ~ 61 61 ~ 55 55 ~ 49 49 ~ 41 41 ~ 35
	9XC	790 ~ 810	241 ~ 197	850 ~ 880	油	65 ~ 61	150 ~ 200 200 ~ 300 300 ~ 400 400 ~ 500 500 ~ 600	64 ~ 63 63 ~ 59 59 ~ 54 54 ~ 47 47 ~ 39
	XΓC	780 ~ 810	255 ~ 207	820 ~ 860	油	≥ 62	—	—
	9XBΓ	780 ~ 800	241 ~ 197	800 ~ 830	油	64 ~ 62	170 ~ 230 230 ~ 275	62 ~ 60 60 ~ 56
	XBΓ	780 ~ 800	255 ~ 207	820 ~ 850	油	65 ~ 63	150 ~ 200 200 ~ 300 300 ~ 400 400 ~ 500 500 ~ 600	63 ~ 62 62 ~ 58 58 ~ 52 52 ~ 46 46 ~ 37
	XBCΓ	790 ~ 810	241 ~ 197	840 ~ 860	油	≥ 62	180 ~ 230 140 ~ 160 200 ~ 250	60 ~ 56 64 ~ 62 59 ~ 57
	9X5BΦ		241 ~ 195	950 ~ 1000	油	≥ 59		
冷 作 模 具 钢	X6BΦ	830 ~ 850	≤ 229	950 ~ 1010	油	64 ~ 62	150 ~ 170 190 ~ 210	63 ~ 62 60 ~ 58
	X12	850 ~ 870	268 ~ 217	950 ~ 1000	油或 空冷	64 ~ 62	200 ~ 400 400 ~ 500 500 ~ 600 600 ~ 700	62 ~ 58 58 ~ 56 56 ~ 50 50 ~ 43

(续)

类别	钢 号	退火温度 /℃	退火后硬度 HBW	淬火温度 /℃	冷却 介质	淬火后硬度 HRC	回火温度 /℃	回火后硬度 HRC
冷 作 模 具 钢	X12MΦ	850 ~ 870	255 ~ 207	1000 ~ 1050	油或 空冷	64 ~ 62	150 ~ 200 200 ~ 300 300 ~ 400 400 ~ 500 500 ~ 600	63 ~ 62 62 ~ 59 59 ~ 57 57 ~ 55 55 ~ 47
				1150 ~ 1130	油或 空冷	48 ~ 45	500 ~ 520	59 ~ 62
	X12Φ		255 ~ 207	1050 ~ 1100	油	≥ 58		
	X12BMΦ	820 ~ 840	≤ 260	960 ~ 1000	油	≥ 65	100 ~ 200 200 ~ 300 300 ~ 400 400 ~ 500	64 ~ 63 63 ~ 61 61 ~ 58 58 ~ 56
热 作 模 具 钢	7X3	800 ~ 820	229 ~ 187	820 ~ 860	油	61 ~ 63	150 ~ 200	62 ~ 60
	8X3	800 ~ 820	255 ~ 207	820 ~ 860	油	61 ~ 63	150 ~ 200 300 ~ 300 300 ~ 400 400 ~ 500 500 ~ 600	62 ~ 60 60 ~ 58 58 ~ 55 55 ~ 50 50 ~ 39
	5XHM	790 ~ 820	241 ~ 197	820 ~ 850	油	60 ~ 58	150 ~ 200 200 ~ 300 300 ~ 400 400 ~ 500 500 ~ 600	60 ~ 58 58 ~ 53 53 ~ 48 48 ~ 43 43 ~ 35
	5XHB	790 ~ 820	241 ~ 197	840 ~ 860	油	59 ~ 55	400 ~ 500 500 ~ 600	47 ~ 41 41 ~ 34
	5XHBC	810 ~ 830	255 ~ 207	860 ~ 880	油	≥ 56	500 ~ 600	41 ~ 35
	5XΓM	790 ~ 810	241 ~ 197	820 ~ 850	油	58 ~ 53	200 ~ 300 300 ~ 400 400 ~ 500 500 ~ 600	57 ~ 52 52 ~ 46 46 ~ 40 40 ~ 34
	4X5B2ΦC		269 ~ 207	1090 ~ 1110	油	≥ 50	580 ~ 620	45 ~ 41
	4X5MΦC	760 ~ 780	≤ 235	1020 ~ 1050	油或 盐浴	≥ 54	550 ~ 600 600 ~ 650	53 ~ 49 49 ~ 39
	4X5MΦ1C	750 ~ 780	≤ 235	1020 ~ 1000	油或 盐浴	≥ 55	550 ~ 600 600 ~ 650	54 ~ 50 50 ~ 42

(续)

类别	钢 号	退火温度 /℃	退火后硬度 HBW	淬火温度 /℃	冷却 介质	淬火后硬度 HRC	回火温度 /℃	回火后硬度 HRC
热 作 模 具 钢	3X2B8Φ	860 ~ 880	255 ~ 207	1075 ~ 1125	油或空冷	52 ~ 49	150 ~ 200 200 ~ 300 300 ~ 400 400 ~ 500 500 ~ 575 575 ~ 700	52 ~ 49 49 ~ 48 48 ~ 46 46 ~ 45 48 ~ 45 48 ~ 40
	4X2B5ΦM	820 ~ 840	220 ~ 180	1060 ~ 1080	油	≥ 50	—	—
耐 冲 击 工 具 用 钢	4XC	820 ~ 840	207 ~ 170	880 ~ 900	油	56 ~ 53	200 ~ 250 250 ~ 350 350 ~ 450 450 ~ 550 550 ~ 650	≥ 52 52 ~ 50 50 ~ 46 46 ~ 38 38 ~ 31
	6XC	820 ~ 840	229 ~ 187	840 ~ 860	油	≥ 62	150 ~ 200 200 ~ 300	62 ~ 60 60 ~ 55
	6XC	820 ~ 840	229 ~ 187	840 ~ 860	油	≥ 62	300 ~ 400 400 ~ 500 500 ~ 600	55 ~ 52 52 ~ 42 42 ~ 36
	4XB2C	800 ~ 820	255 ~ 207	860 ~ 900	油	56 ~ 53	200 ~ 300 300 ~ 400 400 ~ 500 500 ~ 600	53 ~ 51 51 ~ 49 49 ~ 42 42 ~ 33
	5XB2C	800 ~ 820	217 ~ 179	850 ~ 900	油	56 ~ 54	150 ~ 200 200 ~ 300 300 ~ 400 400 ~ 450	54 ~ 52 52 ~ 48 48 ~ 42 42 ~ 36
	6XB2C	780 ~ 800	217 ~ 179	860 ~ 900	油	60 ~ 54	200 ~ 300 300 ~ 400 400 ~ 500 500 ~ 600	58 ~ 53 53 ~ 49 49 ~ 43 43 ~ 35
	6XBΓ	—	285 ~ 299	860 ~ 900	油	≥ 57	—	—

表 16-124 俄罗斯高速工具钢的热加工、热处理与硬度

钢 号	热加工温度 /℃	退火温度 /℃	退火后 硬度 HBW	淬 火		回火温度 /℃	回火后 硬度 HRC
				淬火温度/℃	冷却介质		
11P3AM3Φ2	1100/900	760 ~ 790	≤ 280	1180 ~ 1220	油/盐浴/空冷	530 ~ 550	≥ 64
P6AM5	1100/900	790 ~ 820	≤ 280	1200 ~ 1240	油/盐浴/空冷	540 ~ 560	≥ 64
P6M5Φ3	—	—	≤ 255	1190 ~ 1210	油/盐浴/空冷	540 ~ 560	≥ 64
P6M5K5	1100/900	790 ~ 820	≤ 300	1210 ~ 1250	油/盐浴/空冷	550 ~ 570	≥ 64
P12Φ3	1100/900	780 ~ 810	≤ 280	1230 ~ 1270	油/盐浴/空冷	550 ~ 570	≥ 64
P18	1150/900	820 ~ 850	≤ 300	1250 ~ 1290	油/盐浴/空冷	550 ~ 570	≥ 64
P18K5Φ2	—	840 ~ 860	≤ 293	1280 ~ 1300	油/盐浴/空冷	570 ~ 585	≥ 64

第 17 章 弹簧的热处理

17.1 弹簧钢的化学成分和物理化学性能

1. 化学成分及物理化学性能（表 17-1 ~ 表 17-5）

表 17-1 热轧弹簧钢的化学成分

钢 号	化 学 成 分 （质量分数）（%）								
	C	Si	Mn	Cr	V	其他合金元素	Ni ≤	P ≤	S ≤
65	0.62 ~ 0.70	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	≤ 0.25			0.25	0.040	0.040
70	0.67 ~ 0.75	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	≤ 0.25			0.25	0.040	0.040
75	0.72 ~ 0.80	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	≤ 0.25			0.25	0.040	0.040
85	0.82 ~ 0.90	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	≤ 0.25			0.25	0.040	0.040
65Mn	0.62 ~ 0.70	0.17 ~ 0.37	0.91 ~ 1.20	≤ 0.25			0.25	0.040	0.040
55Si2Mn	0.52 ~ 0.60	1.50 ~ 2.00	0.60 ~ 0.90	≤ 0.35			0.35	0.040	0.040
55Si2MnB	0.52 ~ 0.60	1.50 ~ 2.00	0.60 ~ 0.90	≤ 0.35		P0.0005 ~ 0.004	0.35	0.040	0.040
60Si2Mn	0.56 ~ 0.64	1.50 ~ 2.00	0.60 ~ 0.90	≤ 0.35			0.35	0.040	0.040
60Si2MnA	0.56 ~ 0.64	1.60 ~ 2.00	0.60 ~ 0.90	≤ 0.35			0.35	0.035	0.030
70Si3MnA	0.66 ~ 0.74	2.40 ~ 2.80	0.60 ~ 0.90	≤ 0.35			0.35	0.035	0.030
60Si2CrA	0.56 ~ 0.64	1.40 ~ 1.80	0.40 ~ 0.70	0.70 ~ 1.00			0.35	0.035	0.030
65Si2MnWA	0.61 ~ 0.69	1.50 ~ 2.00	0.70 ~ 1.00	≤ 0.35		W0.80 ~ 1.20	0.35	0.035	0.030
60Si2CrVA	0.56 ~ 0.64	1.40 ~ 1.80	0.40 ~ 0.70	0.90 ~ 1.20	0.10 ~ 0.20		0.35	0.035	0.030
50CrMn	0.46 ~ 0.54	0.17 ~ 0.37	0.70 ~ 1.00	0.90 ~ 1.20			0.35	0.040	0.040
55CrMnA	0.52 ~ 0.60	0.17 ~ 0.37	0.65 ~ 0.95	0.65 ~ 0.95			0.35	0.030	0.030
60CrMnA	0.56 ~ 0.64	0.17 ~ 0.37	0.70 ~ 1.00	0.70 ~ 1.00			0.35	0.030	0.030
60CrMnMoA	0.56 ~ 0.64	0.17 ~ 0.37	0.70 ~ 1.00	0.70 ~ 1.00		Mo0.25 ~ 0.35	0.35	0.030	0.030
55SiMnVB	0.52 ~ 0.60	0.70 ~ 1.00	1.00 ~ 1.30	≤ 0.35	0.08 ~ 0.16	B0.001 ~ 0.0035	0.35	0.040	0.040
50CrVA	0.44 ~ 0.54	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.80 ~ 1.10	0.10 ~ 0.20		0.35	0.035	0.030
30W4Cr2VA	0.26 ~ 0.34	0.17 ~ 0.37	≤ 0.40	2.00 ~ 2.50	0.50 ~ 0.80	W4.00 ~ 4.50	0.35	0.035	0.030
55SiMnMoV	0.52 ~ 0.60	0.90 ~ 1.20	1.00 ~ 1.30	≤ 0.35	0.08 ~ 0.15	Mo0.20 ~ 0.30	0.35	0.040	0.040
55SiMnMoVNB	0.52 ~ 0.60	0.40 ~ 0.70	1.00 ~ 1.30	≤ 0.35	0.08 ~ 0.15	Mo0.30 ~ 0.40 Nb0.01 ~ 0.03	0.35	0.040	0.040

表 17-2 常用弹簧钢加热及冷却时的临界点 (单位:℃)

钢 号	Ac ₁	Ac ₃	Ar ₁	Ar ₃	M _s	钢 号	Ac ₁	Ac ₃	Ar ₁	Ar ₃	M _s
65	727	752	696	730	280	60Si2MnA	755	810	700	770	260
70	730	743	693	727	280	70Si3MnA	765	780	—	—	270
75	725	750	—	—	230	60Si2CrVA	770	780	710	—	
85	723	737	—	695	230	50CrMn	740	785	700	—	300
65Mn	720	740	689	741	270	55SiMnVB	745	790	675	720	
55Si2Mn	775	840	—	—	285	50CrVA	740	810	688	746	300
55Si2MnB	768	—	—	—	289	55SiMnMoV	743	815	620	700	290
60Si2Mn	755	810	700	770	260	55SiMnMoVNB	744	775	550	656	

表 17-3 常用弹簧钢的弹性模量和切变模量

钢 号	淬火温度 /℃	弹性模量 E/MPa				切变模量 G/MPa			
		回火温度/℃				回火温度/℃			
		300	400	450	500	300	400	450	600
65Mn	950		207900	208900	208900		81560	82970	
55Si2Mn		200000				81600	82300		64200
60Si2Mn	860	202700 (360)	208230	209600 (440)	208600 (480)	81430 (350)	82450	83160	
50CrMn	830	210220 (350)	209520 (425)		210930	83200	83900		86300
55SiMnVB	880		212000	202000	209500				
50CrVA		205000 (200)		212000		83500	84200	85300 (500)	86600
55SiMnMoV	860				200000 (580)				
55SiMnMoVNb	830			209600	213550			86250	
30W4Cr2VA		193000	181500	175000	171000				

表 17-4 特殊性能弹簧钢和弹性合金化学成分

钢 号	化学成分(质量分数)(%)					
	C	Si	Mn	P	S	Cr
W18Cr4V	0.70 ~ 0.80	≤0.40	≤0.40	≤0.030	≤0.030	3.80 ~ 4.40
3Cr13	0.25 ~ 0.34	≤0.60	≤0.80	≤0.035	≤0.030	12.0 ~ 14.0
4Cr13	0.35 ~ 0.45	≤0.60	≤0.80	≤0.035	≤0.030	12.0 ~ 14.0
1Cr18Ni9	≤0.12	≤1.8	≤2.0	≤0.035	≤0.030	17.0 ~ 19.0
1Cr18Ni	≤0.12	≤1.8	≤2.0	≤0.035	≤0.030	17.0 ~ 19.0
1Cr18Ni12Mo2Ti	≤0.12	≤1.0	≤2.0	≤0.035	≤0.035	16 ~ 19
0Cr17Ni7Al	≤0.09	≤1.0	≤1.0	≤0.035	≤0.035	16 ~ 18
0Cr12Ni4Mn5Mo3Al	≤0.09	≤0.8	4.4 ~ 5.3	≤0.035	≤0.035	11 ~ 12
0Cr15Ni7Mo2Al	≤0.09	≤1.0	≤1.0	≤0.035	≤0.035	14 ~ 16
00Ni18Co9Mo5TiAl	<0.03	<0.10	<0.10	0.010	0.010	—
Cr14Ni25Mo(A—286)	≤0.08	0.4 ~ 1.0	1.0 ~ 2.0	0.040	0.030	13.5 ~ 16.0
Ni36CrTiAlMo8	≤0.05	≤0.5	0.8 ~ 1.2	0.020	0.020	11.5 ~ 13.0
Ni42CrTiAl	≤0.05	0.5 ~ 0.8	0.5 ~ 0.8	—	—	5.3 ~ 5.9
Inconel718	≤0.10	≤0.75	≤0.50	—	—	17.0 ~ 21.0
Co40NiCrMo	0.07 ~ 0.12	≤0.5	1.8 ~ 2.2	—	—	19 ~ 21

(续)

钢 号	化学成分(质量分数)(%)				
	Ni	Mo	W	V	其 他
W18Cr4V	—	≤0.30	17.5 ~ 19.0	1.00 ~ 1.40	—
3Cr13	—	—	—	—	—
4Cr13	—	—	—	—	—
1Cr18Ni9	8.0 ~ 11.0	—	—	—	—
1Cr18Ni	8.0 ~ 11.0	—	—	—	Ti5 × (C% - 0.02) ~ 0.8
1Cr18Ni12Mo2Ti	11 ~ 14	—	—	—	Ti5 × (C% - 0.02) ~ 0.8
0Cr17Ni7Al	6.5 ~ 7.5	—	—	—	Al0.75 ~ 1.5
0Cr12Ni4Mn5Mo3Al	4 ~ 5	—	—	—	Mo2.7 ~ 3.3 Al0.5 ~ 1.0
0Cr15Ni7Mo2Al	6.5 ~ 7.5	2.0 ~ 3.0	—	—	Al0.75 ~ 1.50
00Ni18Co9Mo5TiAl	18.0 ~ 19.0	4.7 ~ 5.1	—	—	Co8.0 ~ 9.5 Ti0.5 ~ 0.8 Al0.05 ~ 0.15 B < 0.003 Zr < 0.02 Ca < 0.05
Cr14Ni25Mo(A—286)	24.0 ~ 28.0	1.0 ~ 1.5	—	0.1 ~ 0.5	Ti1.9 ~ 2.3 Al ≤ 0.35 B0.003 ~ 0.01
Ni36CrTiAlMo8	35.0 ~ 37.0	7.0 ~ 9.0	—	—	Ti0.7 ~ 3.2 Al0.9 ~ 1.2
Ni42CrTiAl	41.5 ~ 43.5	—	—	—	Ti2.4 ~ 3.0 Al0.4 ~ 0.8
Inconel718	50 ~ 65	2.8 ~ 3.3	—	—	Nb4.50 ~ 5.75 Ti0.3 ~ 1.3 Al0.2 ~ 1.0 Fe18, Co ≤ 1.0 Cu0.75
Co40NiCrMo	15 ~ 17	6.4 ~ 7.4	—	—	Co39 ~ 41

表 17-5 两种不锈钢的弹性模量和切变模量

钢 号	温度/℃	弹性模量 E/MPa	切变模量 G/MPa
1Cr18Ni9	室温	182050	77450
	150	174670	73570
	200	171120	71250
	250	169300	69700

(续)

钢 号	温度/℃	弹性模量 E/MPa	切变模量 G/MPa
1Cr18Ni9	300	163840	67380
0Cr17NiAl	冷拔态	198780	74410
	冷拔 + 时效态	203870	79510

2. 弹簧钢的特点及用途 (表 17-6)

表 17-6 弹簧钢的性能特点与用途

钢 号	性 能 特 点	用 途 举 例
65 70	经热处理或冷作硬化后具有较高强度与弹性, 冷变形塑性低, 淬透性不好, 承受动载和疲劳载荷的能力低, 一般采用油淬, 大截面部件采用水淬油冷或正火处理	应用广泛, 多用于工作温度不高、尺寸较小的弹簧, 或不太重要的较大尺寸弹簧, 如汽车、拖拉机、铁道车辆及一般机械用的弹簧等
85	具有很高的强度、硬度和屈强比, 但淬透性差, 耐热性不好, 承受动载和疲劳载荷的能力低	用于火车、汽车、拖拉机等扁形弹簧、圆形螺旋弹簧及一般机械用的弹簧等
65Mn	强度高, 淬透性和综合力学性能较好, 脱碳倾向小, 但有过热敏感性及回火脆性, 易出现淬火裂纹	用于尺寸稍大的普通弹簧, 如 5~10mm 板簧和线径 1~15mm 螺旋弹簧, 也可作弹簧环、气门簧、制动弹簧、发条、减振器和离合器簧片, 以及用冷拔钢丝制造冷卷螺旋弹簧等
55Si2Mn 55Si2MnB	有较高的强度和弹性极限, 较高的抗松弛能力, 抗回火稳定性好, 脱碳倾向大 55Si2MnB 因含硼, 其淬透性明显改善	用于高应力、交变载荷条件下工作的较大尺寸螺旋弹簧、减振板簧、碟形簧、汽封簧, 还用于 250℃ 以下工作的耐热弹簧
55SiMnVB	有较高的淬透性, 较好的综合力学性能, 以及较高的疲劳寿命, 过热敏感性小, 抗回火稳定性好	主要用于中、小型汽车的板簧, 也可制作其他中等截面尺寸的板簧、螺旋弹簧等
60Si2Mn 60Si2MnA	由于硅含量高, 其强度和弹性极限均比 55Si2Mn 高, 抗回火稳定性好, 淬透性不高, 易脱碳和石墨化	用途很广, 主要用作汽车、机车、拖拉机的减振板簧、螺旋弹簧、气缸安全阀簧、止回阀簧, 也用于制作承受交变载荷及高应力下工作的重要弹簧、抗磨损弹簧等
60Si2CrA 60Si2CrVA	与硅锰弹簧钢相比, 当塑性相近时, 具有较高的抗拉强度和屈服强度, 淬透性较高, 热处理工艺性能好, 但有回火脆性; 因强度高, 卷制弹簧后应及时作消除内应力处理	用于 250℃ 以下工作并承受高载荷的大型弹簧, 如汽轮机汽封弹簧、调节弹簧、冷凝器支承弹簧、高压水泵碟形弹簧、矿用破碎机的缓冲复位弹簧等。60Si2CrVA 钢还用作极重要弹簧, 如常规武器的取弹钩弹簧等
55CrMnA 60CrMnA	有较高的强韧性, 淬透性好, 热加工性能、抗脱碳性能亦好, 过热敏感性比锰钢低而比硅锰钢高, 对回火脆性较敏感, 焊接性差	用作重载荷、高应力条件下工作的大型弹簧, 如汽车、拖拉机、机车的大截面板簧, 直径较大的螺旋弹簧等
60CrMnMoA	与 60CrMnA 钢相比, 基本性能相近, 并提高了淬透性, 降低了过热敏感性, 抗回火稳定性亦好	用作大型土木建筑、重型车辆、机械等使用的特大型弹簧
50CrVA	有较高的强度、屈强比和弹减抗力, 较好的韧性, 高的疲劳强度, 并有高的淬透性和较低的过热敏感性, 脱碳倾向减小, 冷变形塑性低	用作极重要的承受高应力的各种尺寸螺旋弹簧, 特别适宜用于工作应力振幅高、疲劳性能要求严格的弹簧, 以及温度在 300℃ 以下的阀门弹簧、喷油嘴弹簧、气缸胀圈等

(续)

钢 号	性 能 特 点	用 途 举 例
60CrMnBA	基本性能与 60CrMnA 相同, 但淬透性明显提高	用作尺寸更大的板簧、螺旋弹簧、扭转弹簧等
30W4Cr2VA	有良好的室温与高温力学性能, 强度高, 淬透性好, 高温抗松弛和热加工性能也很好	用于工作温度在 500℃ 以下的耐热弹簧, 如汽轮机主蒸汽阀弹簧、汽封弹簧片、锅炉安全阀弹簧、400t 锅炉碟形弹簧等

3. 中外弹簧钢号对照 (表 17-7 和表 17-8)

表 17-7 中国与亚太各国以及国际标准的弹簧钢钢号近似对照

No.	中国 GB	日本 JIS	韩国 KS	美 国		国际标准化组织 ISO
				AISI	UNS	
1	65	SUP2	—	1065	G10650	Type DC
2	70	—	—	1070	G10700	Type DC
3	—	—	—	1078	G10780	
4	85	SUP3	SPS1	1086	G10860	Type DC
5	—	SUP4	—	1095	G10950	
6	65Mn	—	—	1066	—	
7	55Si2Mn	—	—	9255	G92550	56SiCr7
8	60Si2Mn	SUP6	SPS3	—	—	61SiCr7
9	60Si2CrA 60Si2CrVA	—	—	—	—	55SiCr6-3
10	—	SUP7	SPS4	—	—	
11	55CrMnA	SUP9	SPS5	5155	G51550	55Cr3
12	60CrMnA	SUP9A	SPS5A	5160	G51600	
13	60CrMnMoA	SUP13	SPS9	4160	G41610	60CrMo3-3
14	50CrVA	SUP10	SPS6	6150	G61500	51CrV4
15	60CrMnBA	SUP11A	SPS7	51B60	G51601	60Cr1
16	30W4Cr2VA	—	—	—	—	

表 17-8 中国与欧洲各国的弹簧钢钢号近似对照

No.	中国 GB	德 国		法国 NF	俄罗斯 ГОСТ	瑞典 SS ₁₄	英国 BS
		DIN	W-Nr				
1	65	Ck67	1.1231	XC65	65	1770	060A67
2	70	—	—	XC70	70	1778	070A72
3	—	Ck75	1.1248	—	75A	1774	—
4	85	Ck85	1.1269	XC85	85A	≈ 1774	060A86
5	—	Ck101	1.1274	XC100	—	1870	060A96
6	65Mn	—	—	—	65Г	—	080A67
7	55Si2Mn	55Si7	1.0904	55S7	55C2	2085 2090	250A53
8	60Si2Mn	60Si7	1.0909	60S7	60C2	—	—
9	60Si2CrA 60Si2CrVA	60SiCr7	1.0961	60SC7	60C2XA 60C2XΦA	—	—

(续)

No.	中国 GB	德 国		法国 NF	俄罗斯 ГОСТ	瑞典 SS ₁₄	英国 BS
		DIN	W-Nr				
10	—	65Si7	1.0906	—	250A61	—	—
11	55CrMnA	55Cr3	1.7176	55C3	—	—	≈ 527A60
12	60CrMnA	—	—	—	—	—	527A60
13	60CrMnMoA	~ 51CrMoV4	1.7701	~ 51CDV4	—	—	705H60
14	50CrVA	51CrV4	1.8159	50CrV4	50XΦA	2230	735A50
15	60CrMnBA	58CrMnB4	—	—	55XΓP	—	—
16	30W4Cr2VA	30WCrV17.9	1.2243	—	—	—	—

17.2 弹簧的热处理工艺和性能

1. 热处理工艺 (表 17-9 ~ 表 17-19, 图 17-1)

表 17-9 弹簧材料的种类和热处理方法

供应状态	材 料 种 类	热处理方法
热轧材	弹簧钢棒或钢板	淬火、回火
冷拔丝材	弹簧钢棒和磨(抛)光钢丝 碳素弹簧钢丝 琴钢丝 弹簧用不锈钢丝 奥氏体(18-8型)不锈钢丝 马氏体(Cr-13型)不锈钢丝…软态 …硬态 沉淀硬化(17-7PH型固溶处理)不锈钢丝 铜合金丝—黄铜丝 锰青铜及磷青铜丝(正火态) 弹簧用铍青铜丝(固溶热处理) 超级合金(耐热合金)板(Inconel X—760, Elgilloy等固溶处理)	淬火、回火 低温稳定化处理 低温稳定化处理 低温稳定化处理 低温稳定化处理 淬火、回火 低温稳定化处理 沉淀硬化(时效) 低温稳定化处理 低温稳定化处理 沉淀硬化(时效) 沉淀硬化(时效)
冷轧材	磨光特殊钢带(冷轧) 弹簧用不锈钢带 奥氏体不锈钢 马氏体不锈钢 沉淀硬化不锈钢 黄铜板材、磷青铜板、锰青铜板 弹簧用铍青铜板材(固溶处理)	淬、回火或贝氏体等温淬火 低温稳定化处理 淬火、回火 沉淀硬化(时效) 低温稳定化处理 沉淀硬化(时效)
冷轧材	耐热合金板(Inconel x—750, Elgilloy等固溶处理)	沉淀硬化(时效)
退火态	磨光特殊钢带(软态)	淬火、回火或贝氏体等温淬火
淬火回火态	各类油淬火回火钢丝 形变热处理钢丝 弹簧钢带(硬态)	低温稳定化处理 低温稳定化处理 低温稳定化处理
贝氏体等温 淬火态	弹簧钢带	低温稳定化处理

表 17-10 弹簧钢热处理工艺规范

钢 号	热加工温度/℃		退 火			正 火			高温回火		淬 火			回 火										冷却 剂	硬度 HRC
			温度 /℃	冷却 方式	硬度 HBW	温度 /℃	冷却 方式	硬度 HBW	温度 /℃	硬度 HBW	温度 /℃	冷却 剂	硬度 HRC	各种不同温度回火后的硬度值 HRC											
	加热	始锻 终锻												150 ℃	200 ℃	300 ℃	400 ℃	500 ℃	550 ℃	600 ℃	650 ℃	常用回火 温度范围 /℃			
65	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100 800 ~ 850	680 ~ 700	炉冷	≤210	820 ~ 860	空冷		680 ~ 720		800	水	62 ~ 63	63	58	50	45	37	32	28	24	320 ~ 420	水	35 ~ 48	
70	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100 800 ~ 850	780 ~ 820	炉冷	≤225	800 ~ 840	空冷		680 ~ 720		800	水	62 ~ 63	63	58	50	45	37	32	28	24	380 ~ 400	水	45 ~ 50	
85	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100 800 ~ 850	780 ~ 800	炉冷	≤229	800 ~ 840	空冷		600 ~ 680		780 ~ 820	油	62 ~ 63	63	61	52	47	39	32	28	24	375 ~ 400	水	40 ~ 49	
65Mn	1100 ~ 1150	1051 ~ 1100 800 ~ 850	780 ~ 840	炉冷	≤228	820 ~ 860	空冷		680 ~ 720		780 ~ 840	油	57 ~ 64	61	58	54	47	39	34	29	25	350 ~ 530	空气	36 ~ 50	
55Si2Mn	1050 ~ 1150	1000 ~ 1100 850 ~ 950	750	炉冷		830 ~ 860	空冷		640 ~ 680		850 ~ 880	油	60 ~ 63	60	56	57	51	40	37			400 ~ 520	空气	40 ~ 50	
55Si2MnB	1120	1050 800									870	油	≥60	60	59	58	52	45	40	38	35	460	空气	47 ~ 50	
55SiMnVB	1100 ~ 1150	1000 ~ 1100 > 850	800 ~ 840	炉冷		840 ~ 880	空冷		640 ~ 680		840 ~ 880	油	> 60	60	59	55	47	40	34	30		400 ~ 500	水	40 ~ 50	
60Si2Mn 60Si2MnA	1080 ~ 1120	1020 ~ 1080 850 ~ 950	750	炉冷	≤222	830 ~ 860	空冷		640 ~ 680		870	油	> 61	61	60	56	51	43	38	33	29	430 ~ 480	水、空气	45 ~ 50	

(续)

钢 号	热加工温度/℃		退 火			正 火			高温回火		淬 火			回 火													
			温度 /℃	冷却 方式	硬度 HBW	温度 /℃	冷却 方式	硬度 HBW	温度 /℃	硬度 HBW	温度 /℃	冷却 剂	硬度 HRC	各种不同温度回火后的硬度值 HRC							常用回火 温度范围 /℃	冷却 剂	硬度 HRC				
	150 ℃	200 ℃												300 ℃	400 ℃	500 ℃	550 ℃	600 ℃	650 ℃								
	加 热	始 锻	终 锻																								
60Si2CrA						850 ~ 870	空冷		650 ~ 680		850 ~ 860	油	62 ~ 66												450 ~ 480	水	45 ~ 50
60Si2CrVA											850 ~ 860	油	62 ~ 66												450 ~ 480	水	45 ~ 50
55CrMnA	1120 ~ 1160	1060 ~ 1120 850 ~ 900	800 ~ 820	炉冷	≈ 272	800 ~ 840	空冷	≈ 493	650 ~ 680		840 ~ 860	油	62 ~ 66		60	58	55	50	42	31				400 ~ 500	水	42 ~ 50	
60CrMnA											830 ~ 860	油															
60CrMnMoA	1200	1180 800				820 ~ 840	空冷				860	油				59 ~ 63	47 ~ 52	30 ~ 38					24 ~ 29				
50CrVA	1180 ~ 1220	1100 ~ 1160 850 ~ 900	810 ~ 870	炉冷		850 ~ 880	空冷	≈ 288	640 ~ 720		860	油	56 ~ 62		56	55	51	45	39	35	31	28		370 ~ 400 400 ~ 450	水	45 ~ 50 ≤415 HBW	
60CrMnBA											830 ~ 860	油															
30W4Cr2VA	1050	1000 ≥ 850	740 ~ 780	炉冷							1050 ~ 1100	油	52 ~ 58											520 ~ 540 600 ~ 670	空气 或水	43 ~ 47	

表 17-11 硅锰和铬钒弹簧钢在回火温度为 400 ~ 520℃时的保温时间

材料直径/mm	≤ 10	> 10 ~ 15	> 15 ~ 20	> 20 ~ 25	> 25 ~ 42
保温时间/min	25 ~ 30	30 ~ 35	40 ~ 45	50 ~ 60	70 ~ 90

表 17-12 热处理弹簧钢带的力学性能和回火温度

钢 号	强度级别	σ_b /MPa	硬度 HV	推荐的回火温度/℃
T7A、T8A、T9A、T10A	I	1300 ~ 1600	375 ~ 485	490 ~ 570
65Mn、60Si2MnA	II	1610 ~ 1900	486 ~ 600	430 ~ 500
70Si2CrA	III	> 1900	> 600	370 ~ 430

表 17-13 常用弹簧钢的贝氏体等温淬火工艺

钢 号	淬火加热温度/℃	等温温度/℃	等温停留时间/min	处理后的硬度 HRC
75	800 ~ 850	260 ~ 280	10 ~ 20	48 ~ 52
T9A		315 ~ 335	10 ~ 20	43 ~ 48
T10A		320 ~ 360	15 ~ 30	40 ~ 48
65 及 65Mn	820 ~ 860	260 ~ 280	15 ~ 30	≈ 50
		320 ~ 350		46 ~ 48
60Si2MnA 65Si2MnWA	860 ~ 880	280 ~ 320	30	48 ~ 52
50CrVA	860 ~ 900	300 ~ 320	30	48 ~ 52

表 17-14 各种弹簧材料绕制的弹簧去应力退火工艺参数

材 料 名 称		适宜的工艺参数		工 作 条 件
		处理温度/℃	处理时间/min	
冷拔硬钢丝及 琴钢丝	< ϕ 1.27mm	200 ~ 230	10 ~ 30	防止弹簧应力松弛条件下使用，长期工作温度不得超过 120℃
	ϕ 1.28 ~ 3.0mm	230 ~ 260	20 ~ 40	
	> ϕ 3.0mm	275 ~ 290	60 ~ 80	
		300 ~ 350	15 ~ 30	疲劳强度较高场合下使用，工作温度较高
低合金钢 油淬火-回火钢丝		300 ~ 400	20 ~ 40	工作温度：200 ~ 250℃，抗应力松弛性能良好，疲劳强度要求高
18—8 型奥氏体不锈钢丝		350 ~ 450	20 ~ 40	工作温度较高和耐蚀条件下使用
黄 铜		200 ~ 220	≈ 60	使用温度不超过 250℃
磷 青 铜		220 ~ 250	≈ 60	使用温度不超过 275℃
白铜（德银）		300 ~ 350	≈ 60	使用温度不超过 400℃

表 17-15 沉淀硬化型弹簧材料的加工过程、热处理工艺、力学性能及其最高使用温度

序号	材料名称	加工过程及热处理工艺	力学性能	最高使用温度/℃
1	0Cr17Ni7Al (17—7PH)	A处理 (1050℃±14℃×3min+加工成形后水冷)	T处理即调整处理(760℃±10℃×90min, 空冷) → H处理即沉淀硬化处理(565℃±5℃×90min, 空冷)(TH1050) (510℃±5℃×60min, 空冷)(TH950)	$\sigma_b = 145\text{MPa}$, $\delta = 9\%$ $\sigma_{0.2} = 137\text{MPa}$, 43HRC 强硬性比 TH1050 处理的要高，但塑性硬性较低
		调整处理(950℃±10℃×10min, 空冷)(简称 A1750) → 深冷处理 H即(510℃±5℃(-73±10℃×8h) → 冷)硬化处理(简称 R100)(RH950)	$\sigma_b = 1580\text{MPa}$ $\sigma_{0.2} = 1470\text{MPa}$ $\delta = 6\%$, 47HRC	340
		冷变形 >60% → 加工成形 → 沉淀硬化处理(480℃±5℃×1h, 空冷)(简称 CH900)	$\sigma_b = 1860\text{MPa}$ $\sigma_{0.2} = 1820\text{MPa}$ $\delta = 2\%$ 49HRC	

(续)

序号	材料名称	加工过程及热处理工艺	力学性能	最高使用温度/℃
2	Be—Cu 合金	780℃ × 1h, 水冷 (固溶处理) → 315℃ × 2h, 空冷	$\sigma_b = 1100 \sim 1590\text{MPa}$ $E = 130\text{GPa}$, $G = 50\text{GPa}$ 35 ~ 42HRC (400HBW)	150
3	Fe—Ni 基高弹性合金	3J1 950℃ 固溶处理 → 675℃ × 4h, 空冷	$\sigma_b \geq 1373\text{MPa}$, $\delta_5 \geq 5\%$	350
		3J2 980 ~ 1000℃ 固溶处理 → 750℃ × 4h, 空冷	$\sigma_b \geq 1472\text{MPa}$	400
		3J3	$\sigma_b \geq 1472\text{MPa}$ $\delta_5 = 6\% \sim 7\%$ 46 ~ 47HRC	
4	Ni73Cr15Fe7NbTi (Inconel × 750)	1150℃ × 2h, 空冷 (固溶处理) → 815℃ × 24h 空冷 → 705℃ × 20h, 空冷	$\sigma_b = 1275 \sim 1344\text{MPa}$ $\sigma_s = 903 \sim 1040\text{MPa}$ $\delta = 21\% \sim 26\%$	400 ~ 600
	Inconel718	925℃ × 1h 空冷 980℃ × 1h 空冷 + 840℃ × 3h 空冷 } 固溶处理 → 720℃ × 8h + 620℃ × 8h	$\sigma_b = 1403\text{MPa}$ $\sigma_s = 1167\text{MPa}$ $\delta = 20\%$	600

表 17-16 几种弹簧钢的最高使用温度及热处理规范

钢 号	最高使用温度 /℃	热成形温度 /℃	淬火加热温度 /℃	回火温度 /℃
60Si2MnA	250	830 ~ 920	860 ~ 880, 油淬	350
50CrVA	300	830 ~ 920	850 ~ 870, 油淬	370 ~ 420
60Si2CrA	300	830 ~ 920	830 ~ 860, 油淬	430 ~ 500
60Si2CrVA	350	830 ~ 950	850 ~ 870, 油淬	430 ~ 480
60Si2MnWA	350	830 ~ 950	840 ~ 860, 油淬	430 ~ 480
30W4Cr2VA	500	880 ~ 960	1050 ~ 1100, 油淬	600 ~ 700
3Cr13	240 ~ 400	850 ~ 1050	980 ~ 1050, 油淬	540 ~ 560
18—8 型奥氏体不锈钢丝 (冷拔态)	300 ~ 400	冷拔	—	400℃ 去应力退火 15 ~ 60min
0Cr17Ni7Al (17—7PH) 冷拔态	350 ~ 400	冷拔	—	480 ± 5℃, 1h 时效处理
3Cr2W8VA	350 ~ 550	950 ~ 1150	1050 ~ 1100, 油淬	600 ~ 650
65Cr4W3Mo2VNb	350 ~ 550	850 ~ 1100	1100 ~ 1120, 油淬	600 ~ 650
W 18Cr4V	350 ~ 550	1000 ~ 1200	1280 ~ 1290, 油淬	700

表 17-17 弹簧淬火后常见缺陷及防止措施

缺陷名称	对弹簧性能的影响	防止措施
脱碳	降低使用寿命	1. 控制加热炉气氛 2. 采用快速加热工艺
淬火后硬度不足非马氏体组织数量较多, 心部出现铁素体	产生残余变形, 降低使用寿命	1. 控制原材料淬透性或选用淬透性较好的钢材 2. 选择合适冷却能力的淬火介质 3. 弹簧进入淬火介质的温度应控制在 A_{r3} 以上 4. 适当提高淬火加热温度
过热	脆性增加	严格控制淬火加热或成形加热温度

(续)

缺陷名称	对弹簧性能的影响	防止措施
开裂	脆性增加, 严重降低使用寿命	1. 控制淬火加热温度 2. 淬冷时, 冷到 250 ~ 300℃ 时, 即取出空冷 3. 及时回火 4. 采用贝氏体等温淬火或马氏体分级淬火

表 17-18 弹簧钢脱碳层深度的规定

钢组	公称直径 或厚度 /mm	总脱碳层的深度不大于直径或厚度的 (%)	
		一 级	二 级
硅弹簧钢	≤ 8	2.5	3.0
	> 8 ~ 30	2.0	2.5
	> 30	1.5	2.0
其他钢	≤ 8	2.0	2.5
	> 8	1.5	2.0

注: 当需方要求一级脱碳时, 应在合同中注明。

表 17-19 脱碳对 60Si2MnRE 钢板
弹簧疲劳寿命的影响

脱碳层深度 /mm	淬火回火后硬度 HRC	试验应力 /MPa	断裂时次数
0.089	43 ~ 44.5	650	245000
0.141	44 ~ 45	650	131000
0.197	43 ~ 44	650	129600

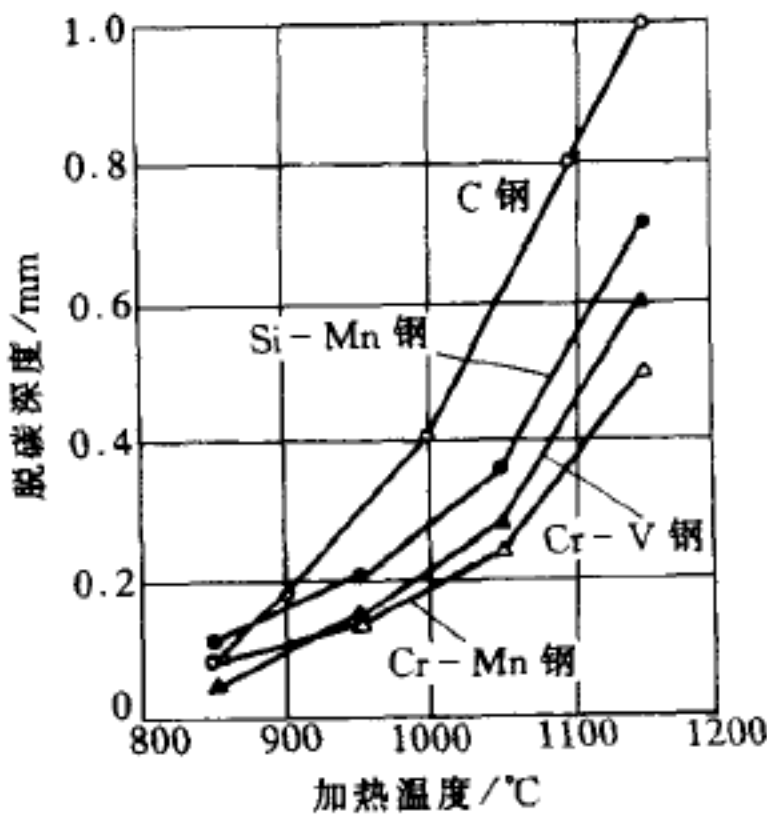


图 17-1 各种弹簧钢加热温度和脱碳层的关系
(加热 30min)

2. 力学性能(表 17-20 ~ 表 17-30, 图 17-2 ~ 图 17-11)

表 17-20 热轧弹簧钢热处理后的力学性能及应用举例

钢 号	热处理			力学性能(不小于)					交货 状态	HBW ≤	主 要 用 途
	淬火 温度 /℃	淬火 介质	回火 温度 /℃	屈服点 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 (%)		断面收 缩 率 ψ (%)			
						δ_5	δ_{10}				
65	840	油	500	800	1000	—	9	35	热轧	285	用作一般机器上的圆、 方螺旋弹簧或冷拔钢丝 作小型机械的弹簧
70	830	油	480	850	1050	—	8	30	热轧	285	
75	820	油	480	900	1100	—	7	30	热轧	302	用作汽车、拖拉机上承 受振动的圆螺旋弹簧
85	820	油	480	1000	1150	—	6	30	热轧	302	用作汽车、拖拉机及一 般机器上的扁形弹簧、圆 形螺旋弹簧,以及其他用 途的钢丝等
65Mn	820	油	540	800	1000	—	8	30	热轧	302	用作截面直径小于 15mm 的中小型低应力弹 簧如坐垫板簧,弹簧发条 等。冷拔钢丝的冷卷成 形弹簧

(续)

钢 号	热处理			力学性能(不小于)					交货 状态	HBW ≤	主 要 用 途
	淬火 温度 /℃	淬火 介质	回火 温度 /℃	屈服点 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 (%)		断面收 缩 率 ψ (%)			
						δ_5	δ_{10}				
55Si2Mn	870	油	480	1200	1300	—	6	30	热轧	302	用作汽车、拖拉机、铁 道车辆上的板簧、螺旋弹 簧等,以及温度在 250℃ 以下的中等应力弹簧
60Si2Mn	870	油	480	1200	1300	—	5	25	热轧	321	用作汽车、拖拉机、铁 道车辆上的板簧、螺旋弹 簧,气缸安全阀及止回阀 簧,也用于制造承受交变 载荷及中等应力下工作 的大型弹簧等
60Si2MnA	870	油	440	1400	1600	—	5	20	热轧	321	
70Si3MnA	860	油	430	1600	1800	—	5	20	热处理	302	用作承受重载荷的重 要弹簧,如炮位输弹平衡 机用簧等
60Si2CrA	870	油	420	1600	1800	6	—	20	热处理	302	用作承受重载荷和重 要用途的大型螺旋弹簧 和板簧
60SiMnWA	850	油	420	1700	1900	5	—	20	热处理	302	用作极重要的和重载 下工作的螺旋弹簧与板 簧
60Si2CrVA	850	油	410	1700	1900	6	—	20	热处理	302	
50CrMn	840	油	490	1100	1300		5	35	热轧	321	用作载荷较高,应力较 大的板簧,也用作直径较 大(50mm)的螺旋弹簧
50CrVA	850	油	500	1150	1300	10	—	40	热轧	321	用作特别重要的承受 大应力的各种尺寸的螺 旋弹簧,也可用作大截面 的以及在 300℃ 以下工 作的重要弹簧,如各种阀 门弹簧,喷油嘴弹簧
30W4Cr2VA	1050 ~ 1100	油	600	1350	1500	7	—	40	热处理	321	用作高温(500℃ 以下) 条件使用的弹簧,如 400t 锅炉蝶阀弹簧等
55Si2MnB	870	油	480	1200	1300	—	6	30	热轧	321	用于汽车前后簧、副簧
55SiMnVB	860	油	460	1250	1400	—	5	30			用于汽车前后簧、副簧
55SiMnMoI	880	油	550	1300	1400	—	6	30	热轧	321	用于重型汽车板簧,越 野汽车板簧
55SiMnMoVNB	880	油	530	1300	1400	—	8	35	热轧	321	用于重型汽车板簧,越 野汽车板簧

表 17-21 贝氏体等温淬火及随后回火对 60Si2MnA 钢力学性能的影响

热处理工艺 ^①	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服点 σ_s /MPa	弹性极限 /MPa	伸长率 (%)	断面收缩率 (%)	冲击韧度 a_K /J·cm ⁻²
290℃贝氏体等温淬火(等温 45min)	2090	1750	1400	11	40	50
同上,在 150℃补充回火 1h	2020	1800	1600	12	46	60
同上,在 290℃补充回火 1h	1970	1850	1680	12.5	50	50
同上,在 400℃补充回火 1h	1840	1750	1600	13.5	40	38
普通油淬后在 420℃回火 40min	1800	1680	1550	11	48	35

① 淬火温度均为 840~860℃。

表 17-22 75 钢经贝氏体等温淬火和普通淬火、回火后力学性能比较

热处理工艺	硬度 HRC	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服点 σ_s /MPa	伸长率 δ (%)	断面收缩率 ψ (%)	冲击韧度 a_K /J·cm ⁻²
贝氏体等温淬火	50.4	2010	1020	1.9	34.5	48
淬火、回火	50.2	1750	870	0.3	0.7	4

表 17-23 平衡弹簧(65Mn 钢)经不同热处理后的力学性能和组织

热处理工艺 ^①	显微组织	淬火后硬度 HRC		回火后硬度 HRC		回火后抗拉强度 σ_b /MPa	
		1	2	1	2	1	2
直接油淬(820℃×10min)	100% M	61	62	48	49	1580	1707
马氏体分级淬火(860℃加热 8min, 280℃ 分级 2min, 淬火)	70% M + 30% B _下	58	57	50	50	1687	1717
马氏体分级-贝氏体等温淬火(860℃加热 8min, 280℃等温停留 20min)水冷	30% M + 70% B _下	55	56	50	50	1707	—
下贝氏体等温淬火(860℃加热 8min, 280℃等温停留 30min)水冷	≈ 100% B _下	52	53	50	50	1687	—

① 均在 370℃硝盐浴中回火 30min, 1—10mm×2.5mm 带钢, 2—12mm×2.5mm 带钢; M—马氏体, B_下—下贝氏体。

表 17-24 不同规格的弹簧经淬火回火后的硬度范围

序号	弹簧类别	硬度范围 HRC	钢 种
1	重板弹簧	碳素钢: 331~401HBW 合金钢: 341~415HBW	70, 75, 80, 95, T9A, T10A 55Si2Mn, 50CrMn, 50CrVA, 60Si2Mn
2	汽车用重板弹簧	388~461HBW	55Si2Mn, 60Si2Mn, 50CrMn, 50CrVA, 60CrMn, 55SiMnMoV
3	热成形螺旋弹簧	碳素钢: 352~415HBW 合金钢: 388~461HBW	70, 75, 80, 85, T9A, T10A 60Si2Mn, 50CrMn, 50CrVA, 60CrMn
4	汽车用热成形螺旋弹簧	415~465HBW	60Si2MnA, 50CrMn, 50CrVA, 55CrSi, 60Si2CrA
5	扭 杆	401~477HBW	60Si2MnA, 50CrMn, 50CrVA, 55CrMn
6	碟形弹簧	43~50	60CrMn, 60Si2MnA
7	弹簧垫圈	42~50	弹簧钢带
8	齿轮副垫圈	40~50	50~70 磨光碳素钢带
9	碟形弹簧垫圈	40~48	50~70 磨光碳素钢带
10	汽车用波形垫圈	40~50	60~70 或 T8Mn 磨光钢带
11	C 形卡簧	44~53	60~70T8Mn 磨光钢带

(续)

序号	弹簧类别	硬度范围 HRC	钢 种
12	E 形卡簧	44 ~ 53	60 ~ 70T8Mn 磨光钢带
13	C 形同心卡圈	40 ~ 50	高碳钢线材
14	漂移卡圈	46 ~ 51	60 ~ 70 或 T8Mn 磨光钢带
15	弹簧销	45 ~ 50	60 ~ 70 或 T8Mn 磨光钢带
16	汽车用舌簧	40 ~ 50	普通的或退火态高碳钢丝
17	汽车用扣子销	40 ~ 50	普通的或退火态高碳钢丝

表 17-25 特殊性能弹簧用钢和弹性合金力学性能的实测数据及用途举例

钢 号	热 处 理	力 学 性 能					用途举例
		σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ (%)	ψ (%)	HRC	
3Cr13	1050℃ 油淬, 450℃ 回火	1750	$\sigma_{0.2}$ 143	15	46	47 ~ 50	适于耐腐蚀的弹簧
1Cr18Ni9Ti	冷拔钢丝 $\phi 1\text{mm}$	1800 ~ 2000	—	—	—	—	适于在腐蚀性较强介质的弹簧
1Cr18Ni12Mo2Ti	冷拔钢丝 $\phi 4 \sim 5\text{mm}$	1400 ~ 1600	—	—	—	—	适用于还原性介质中的弹簧
0Cr17Ni7Al	I .1050℃ 空冷 → 950℃ 10min + 4min/ mm, 空冷 → -73℃, 8h → 510℃, 1h 空冷	I 1580 II 1860	1470 1820	δ_4 6 δ_4 2	— —	47 49	加工性能好, 可作 耐腐蚀弹簧, 耐高温 弹簧
0Cr15Ni7Mo2Al	II .1050℃ 空冷 → 60% 以上冷加工 → 480℃ 1h 空冷	I 1640 II 1860	1520 1820	δ_4 6 δ_4 2	— —	48 50	
0Cr12Ni4Mn5Mo3A	冷加工 60% → 520℃ 空冷	1850	—	—	—	—	
00Ni18Co9Mo5TiAl	820℃ 30min 空冷 → 480℃ 3h 空冷	2060	$\sigma_{0.2}$ 2040	11.8	5.7	52 ~ 55	仪表用弹性敏感元件
Cr14Ni25Mo(A—286)	980℃ 1h 油淬 → 30% 冷加工 → 650 ~ 700℃ 8 ~ 16h 空冷	1270 ~ 1380	$\sigma_{0.2}$ 1100 ~ 1210	δ_4 10 ~ 16	43 ~ 52	—	耐高温弹簧, 转子发动机的刮片弹簧
Ni36CrTiAlMo8	1000 ~ 1050℃ 水淬 → 750℃ 4h 空冷	1400 ~ 1500	$\sigma_{0.2}$ 1100 ~ 1150	6 ~ 7	—	46	高弹性合金
Ni42CrTiAl	910℃ ± 10℃ 水淬 → 600℃ 3h 空冷	1200 ~ 1250	$\sigma_{0.2}$ 800 ~ 1000	10 ~ 15	—	35 ~ 38	恒弹性合金, 用于 钟表游丝、弹簧天平、测压、测力仪表等
Inconel 718	1040℃ 1h 空冷 → 720℃ 8h, 炉冷 50℃/h → 620℃ 8h 空冷	1390	$\sigma_{0.2}$ 1185	25	48	—	镍基耐热弹性合金, 最高使用温度 600℃, 最低使用温度 -253℃, 可制转 子发动机刮片弹簧
Co40NiCrMo	1100 ~ 1150℃ 水冷 → 冷加工 → 400 ~ 450℃ 4h 空冷	2500 ~ 2700	$\sigma_{0.2}$ 2300 ~ 2500	3 ~ 5	—	54 ~ 58	高强度弹性合金, 用于钟表弹簧, 测量 弹簧

表 17-26 淬透性对 55Si2Mn 钢疲劳寿命的影响^①

编 号	淬 透 性		热 处 理		疲劳寿命 ^③ /次数
	至水冷端 6mm 处 硬 度 HRC	至水冷端 9mm 处 硬 度 HRC	淬 火	回 火	
1	40	32.5	连续式加热炉, I 区温度 980℃	550 ~ 560℃,	11.63×10^4
2	50	36	II 区温度 1020℃	45min,	12.42×10^4
3	62	57	III 区温度 1000℃	回火后	17.01×10^4
4 ^②	62	58	加热时间 12min, 加热后压弯淬油	水冷	39.4×10^4

① 用单片板簧进行疲劳试验的结果,试样为载重汽车后钢板弹簧第 7 片,尺寸为:9.5mm×76mm×840mm,试验条件:最大应力 1000MPa(此时弹簧片变形 56mm),应力幅 427MPa,频率:600 次/min。

② 加硼的 55Si2Mn 钢。

③ 分别为 5~10 个试验结果的平均值。

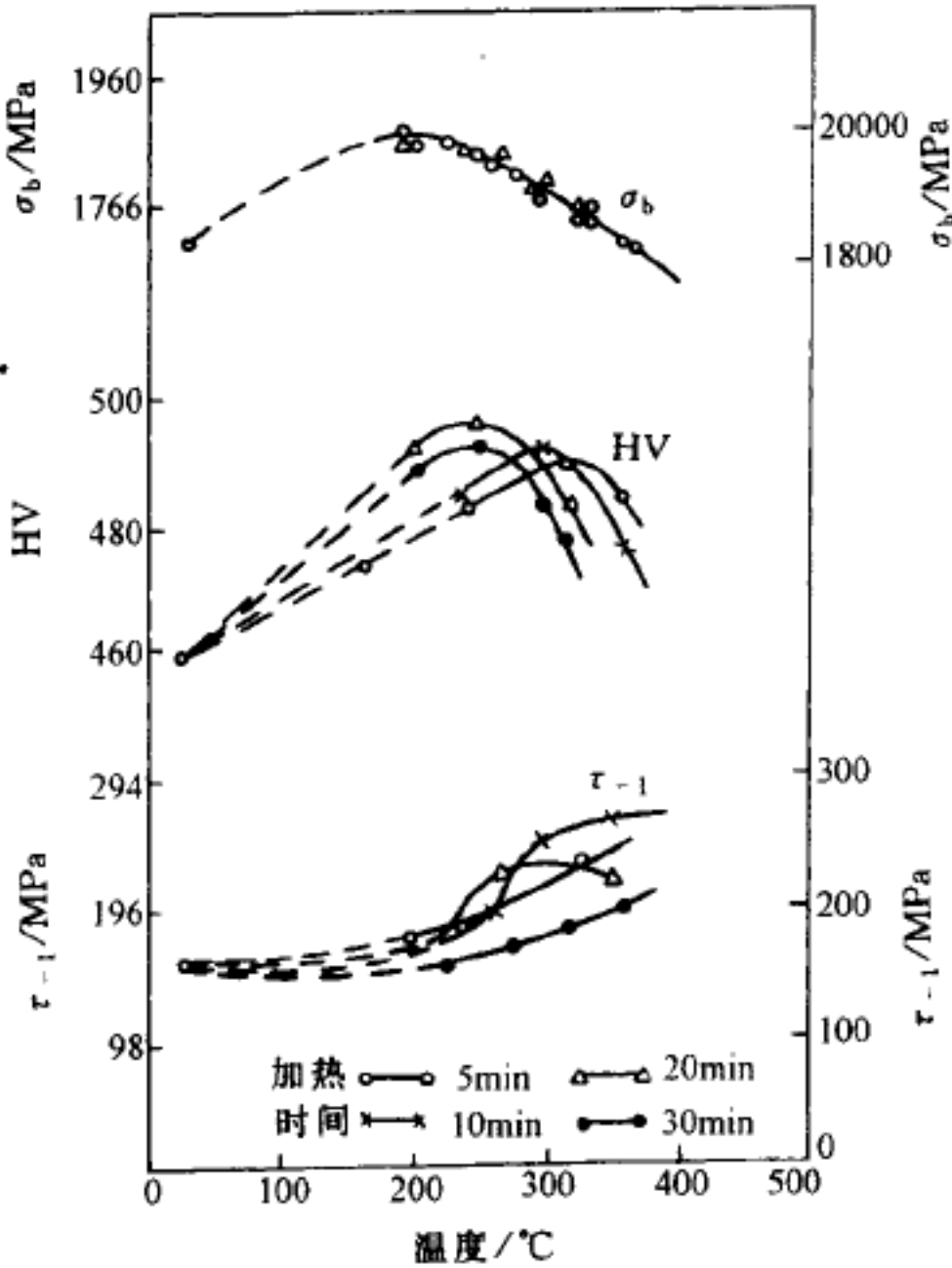


图 17-2 去应力退火工艺对琴钢丝力学性能的影响

表 17-27 油淬回火钢丝的力学性能

钢丝直径 /mm	抗拉强度 ^① /MPa			钢丝直径 /mm	抗拉强度 ^① /MPa		
	碳素钢	Cr—V 钢	Cr—Si 钢		碳素钢	Cr—V 钢	Cr—Si 钢
2.00	1450 ~ 1600	1600 ~ 1750	1950 ~ 2100	3.50	1450 ~ 1600	1600 ~ 1750	1900 ~ 2050
2.30	1450 ~ 1600	1600 ~ 1750	1950 ~ 2100	4.00	1450 ~ 1600	1550 ~ 1700	1850 ~ 2000
2.60	1450 ~ 1600	1600 ~ 1750	1950 ~ 2100	4.50	1400 ~ 1550	1550 ~ 1700	1850 ~ 2000
2.90	1450 ~ 1600	1600 ~ 1750	1950 ~ 2100	5.00	1400 ~ 1550	1500 ~ 1650	1800 ~ 1950
3.20	1450 ~ 1600	1600 ~ 1750	1900 ~ 2050				

① 同一捆钢丝的强度波动范围应在 75MPa 范围内。

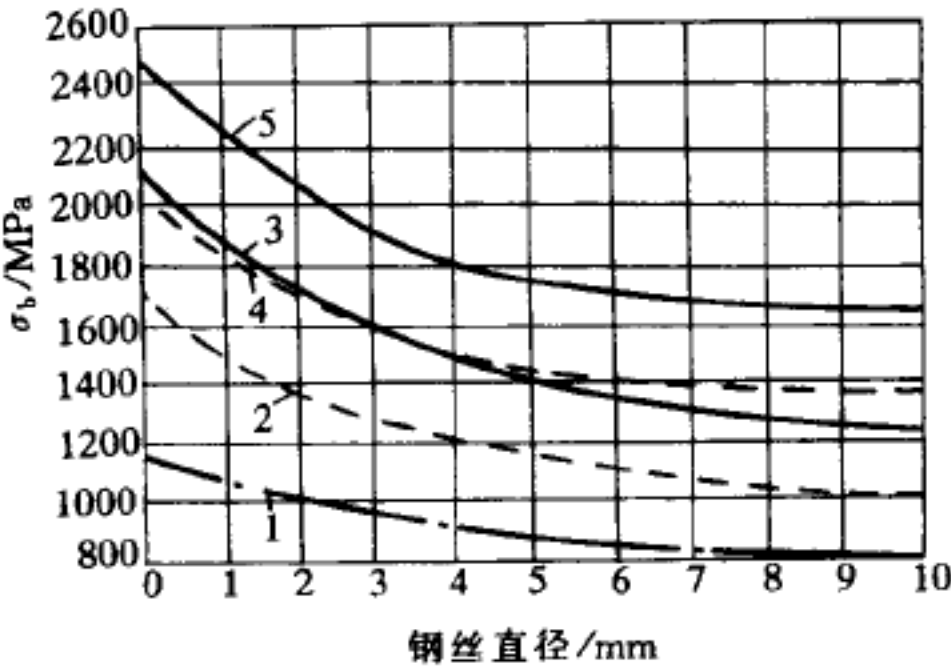


图 17-3 18—8 型奥氏体不锈钢丝在不同状态下的抗拉强度与其直径大小的关系

1—1Cr18Ni9 软态钢丝 2—1Cr18Ni9 冷拔半硬态钢丝
3—1Cr18Ni9 硬态钢丝 4—17—7PH 钢丝冷拔后
5—17—7PH 钢丝冷拔后,再经 480℃×1h 时效处理

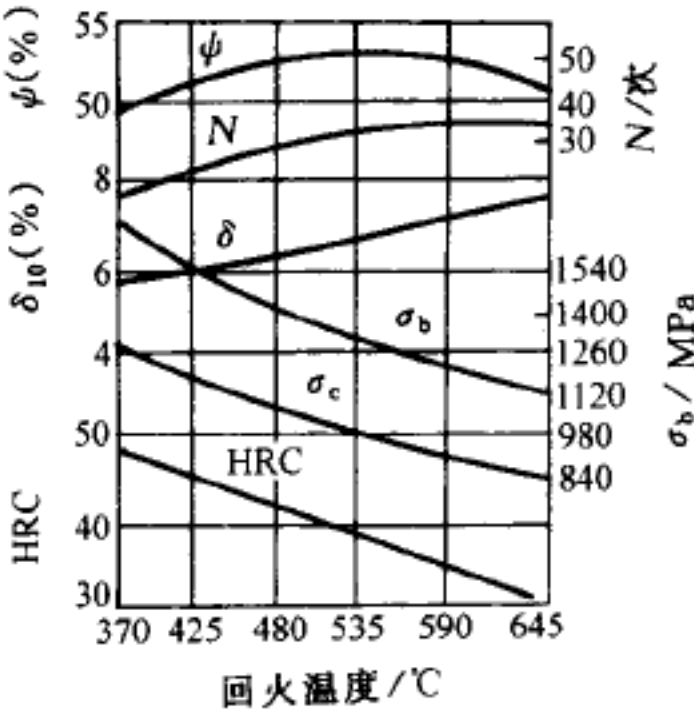


图 17-4 65Mn 钢不同温度回火后的力学性能
(用钢成分,%, w_c 0.65, w_{Mn} 0.80;3mm 钢丝,
油淬后于 370~650℃盐浴中回火;
 N —100d 试样的扭转转数)

表 17-28 60Si2Mn 钢板弹簧经高温形变热处理与普通热处理后力学性能比较

序号	热处理工艺	力学性能				a_K /J·cm ⁻²	硬度 HRC	疲劳寿命或疲劳极限	
		σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ (%)	ψ (%)			试验应力 /MPa	循环次数 /万次
1	高温形变热处理	2415	2280	7.7	40	68	56	950	145.0
2	普通热处理	1670	1500	7.0	14	59	46	930	48.3
3		1520	1395	10.0	42	33.5	44	930	17.4
4	高温形变热处理	1705	1580	11.0	20	弯曲疲劳极限	48 ~ 49	循环应力	$N/\times 10^4$
						725MPa		1099 ~ 110MPa 1226 ~ 123MPa	79.0 33.0
5	普通热处理	1422	1295	9.5	29	650MPa	43 ~ 45	1099 ~ 110MPa 1226 ~ 123MPa	27.1 17.0

注:1.930℃加热,变形量 18%,15s 空冷,油淬,650℃回火 3min。
2.930℃加热,15s 空冷,油淬,650℃回火 3min。
3.930℃加热,油淬,480~520℃回火 30min。
4.920~930℃加热,变形量 30%,空冷 7~10s,油淬,580℃回火 60min 水冷。
5.920~930℃加热(板厚为 4mm),油淬,580℃回火 60min,水冷。

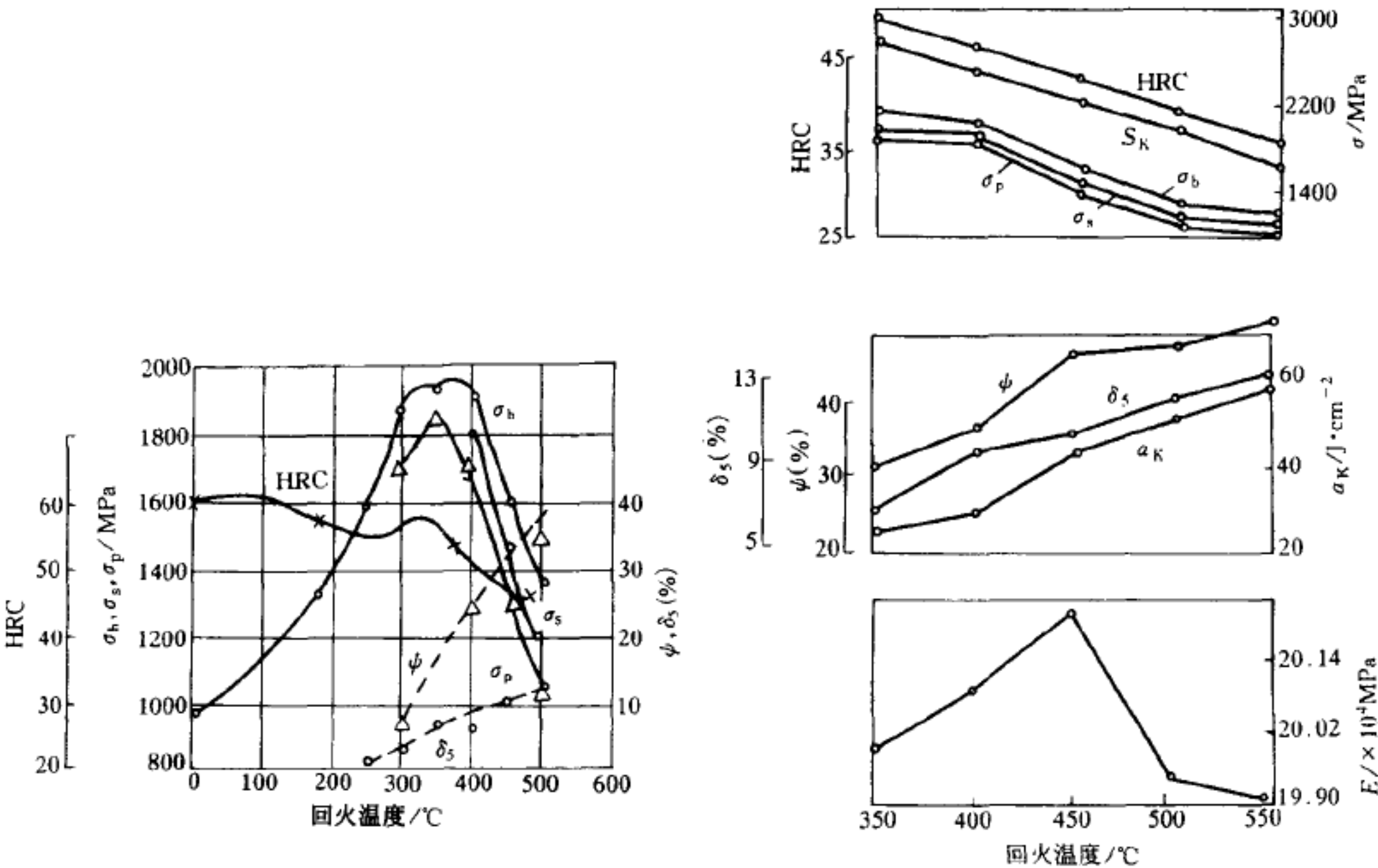


图 17-5 55Si2Mn 钢不同温度回火后的力学性能
(用钢成分, %: w_C 0.56, w_{Si} 1.79, w_{Mn} 0.82; 870℃油淬) S_K 为真实断裂强度

表 17-29 50CrVA 气阀弹簧氮碳共渗和普通热处理后疲劳寿命及耐蚀性能比较

热处理工艺	断裂周次 $\times 10^4$	断裂后的 残余变形 /mm	室温耐大气 腐蚀性能
860℃油淬, 420℃回火 1h	1.78	2.4	处理后未上油, 14 天后出现锈斑
860℃油淬 480℃氮碳共渗 3h	> 100	0.2	850 天以上未生 锈
860℃油淬 510℃氮碳共渗 3h	> 100	0.6	850 天以上未生 锈

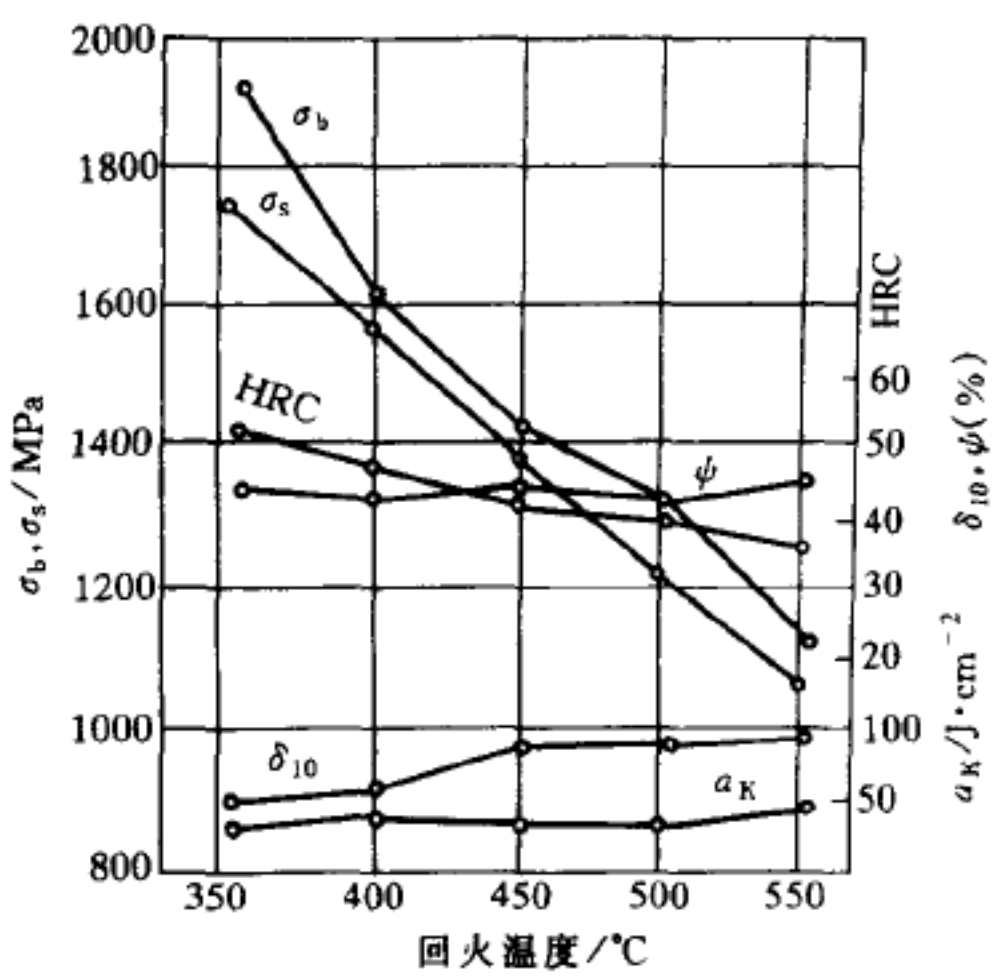


图 17-6 55SiMnVB 不同温度回火后的力学性能(860℃油淬)

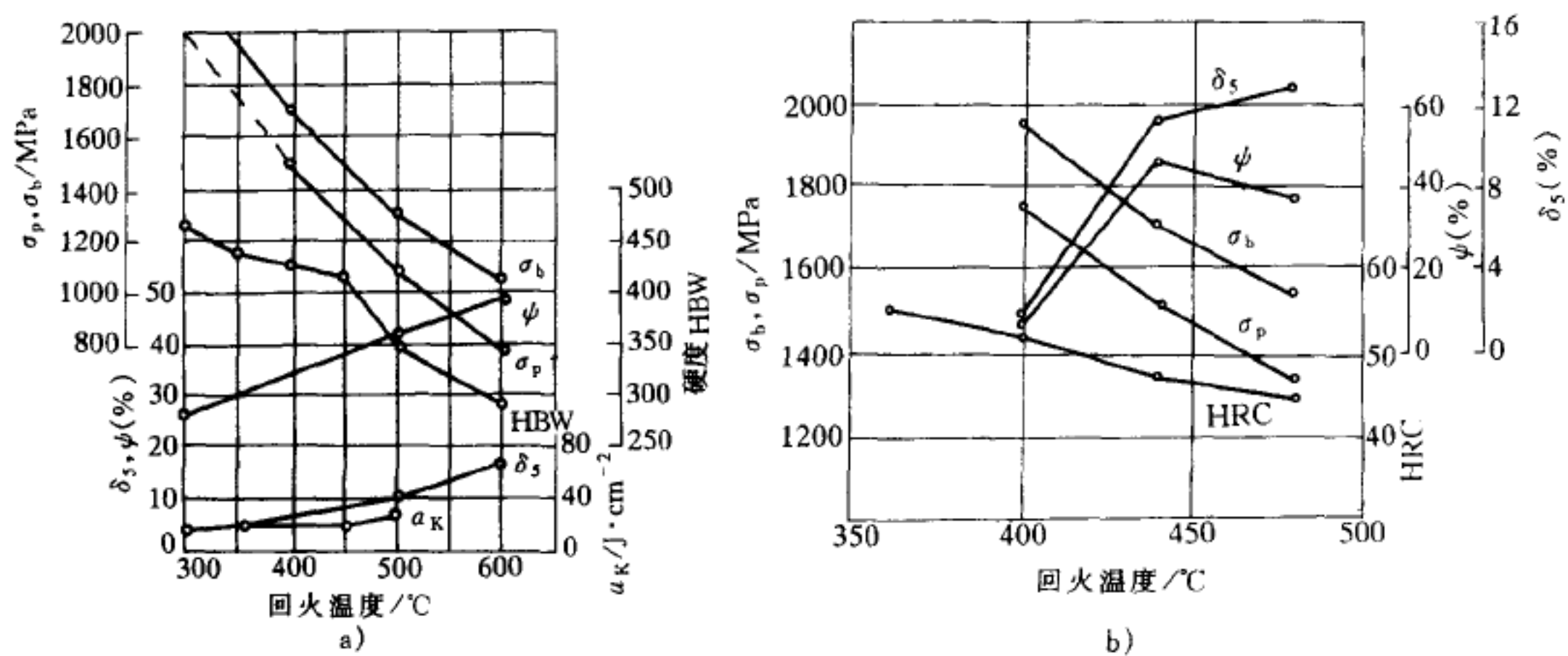


图 17-7 60Si2Mn 不同温度回火后的力学性能

a) 用钢成分(质量分数, %); C0.58, Si1.66, Mn0.52, Cr0.06, P0.027, S0.014; 850℃油淬。
b) 用钢成分, %; C0.60, Si1.85, Mn0.79; 860℃淬火成分均指质量分数

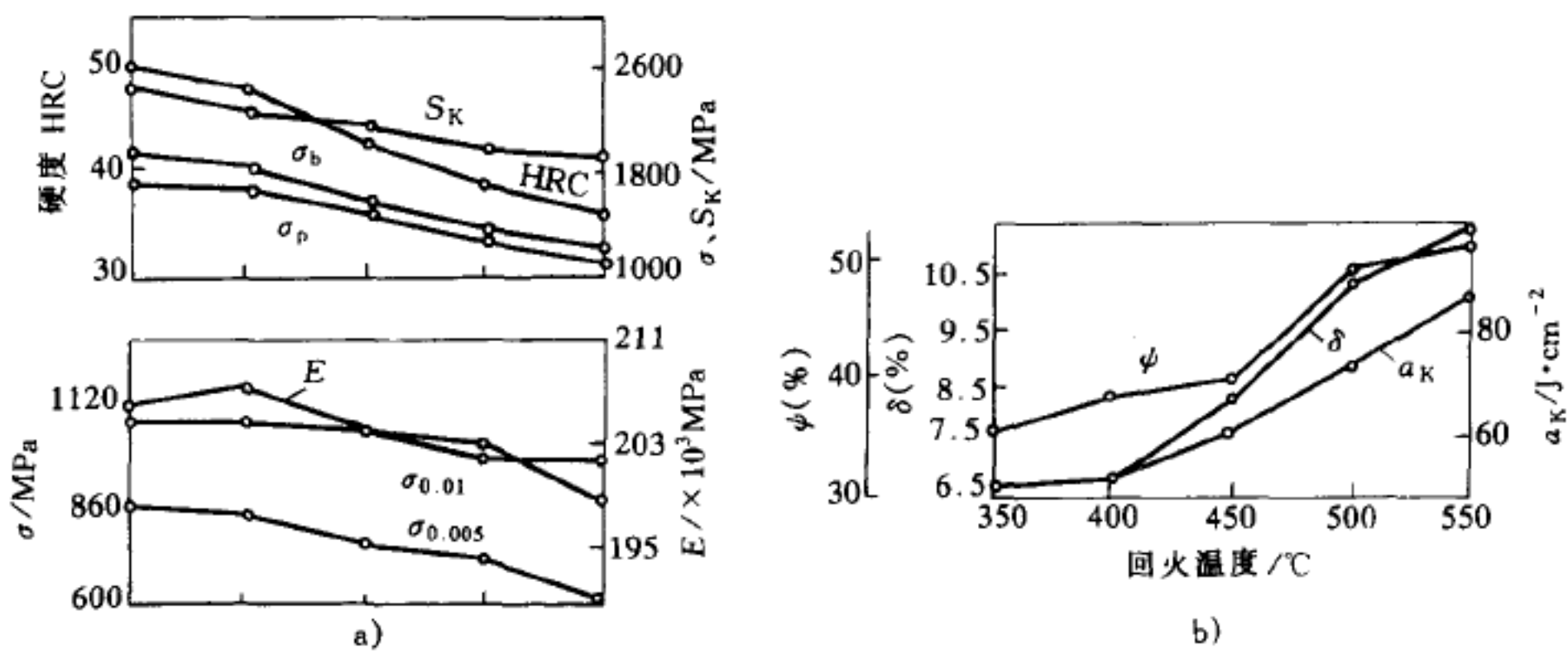


图 17-8 50CrMn 钢回火温度对力学性能的影响

表 17-30 55SiMnMoV 钢不同温度回火后的力学性能

热处理制度	σ_b	$\sigma_{0.2}$	δ_5	ψ	a_K	HRC
	/MPa		(%)		/J·cm ⁻²	
860℃油淬,520℃回火	1570	1470	11	34	33	46.5
860℃油淬,550℃回火	1460	1370	11	37		
860℃油淬,580℃回火	1460	1360	14	40.5	33	44
860℃油淬,600℃回火	1440	1360	12			

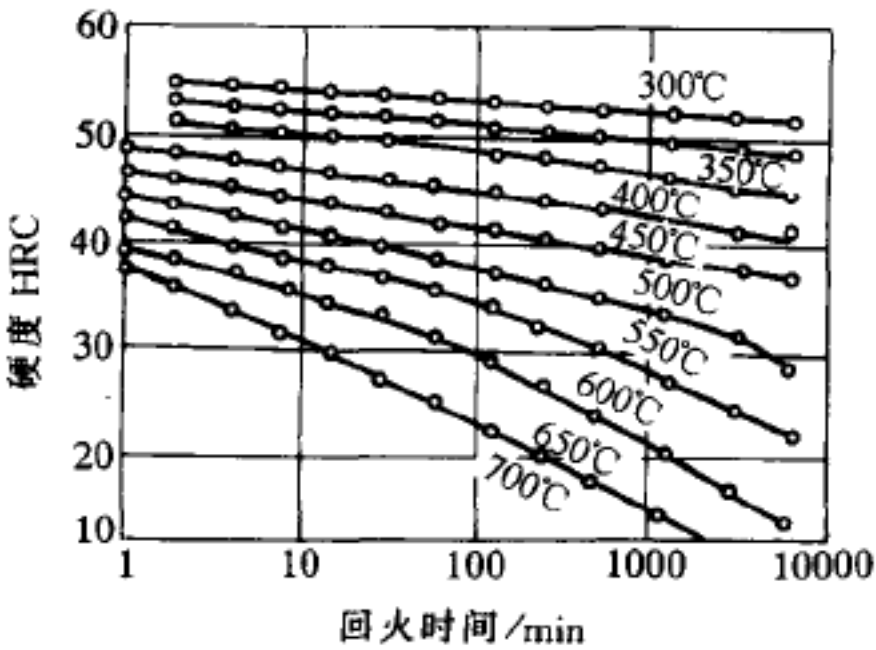


图 17-9 50CrMn 弹簧钢回火后的硬度和回火温度时间的关系

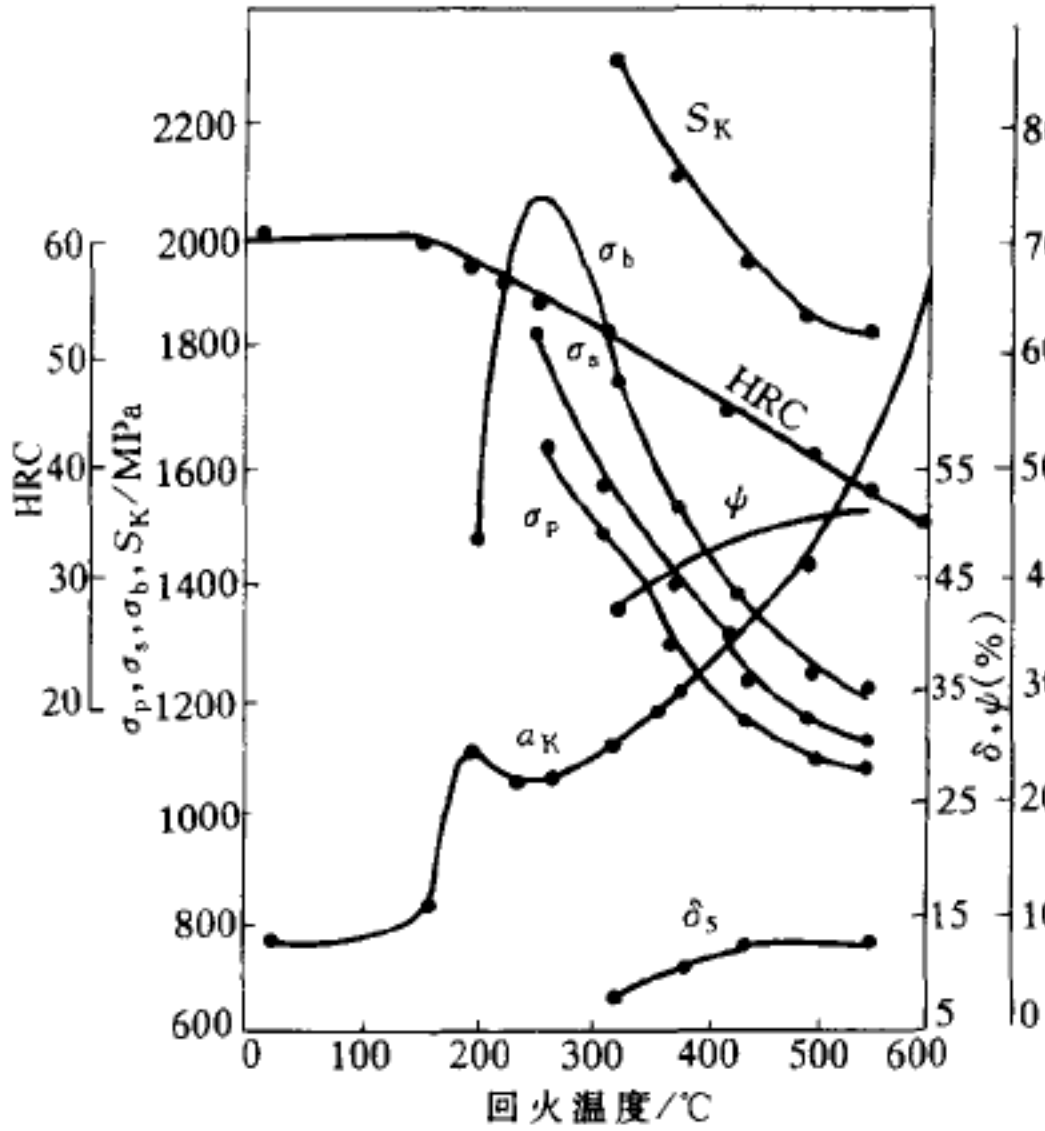


图 17-10 50CrVA 钢不同温度回火后的力学性能
(用钢成分, % : C0.51, Si0.24, Mn0.57, Cr0.98, V0.15; 830℃油淬,成分均指质量分数)

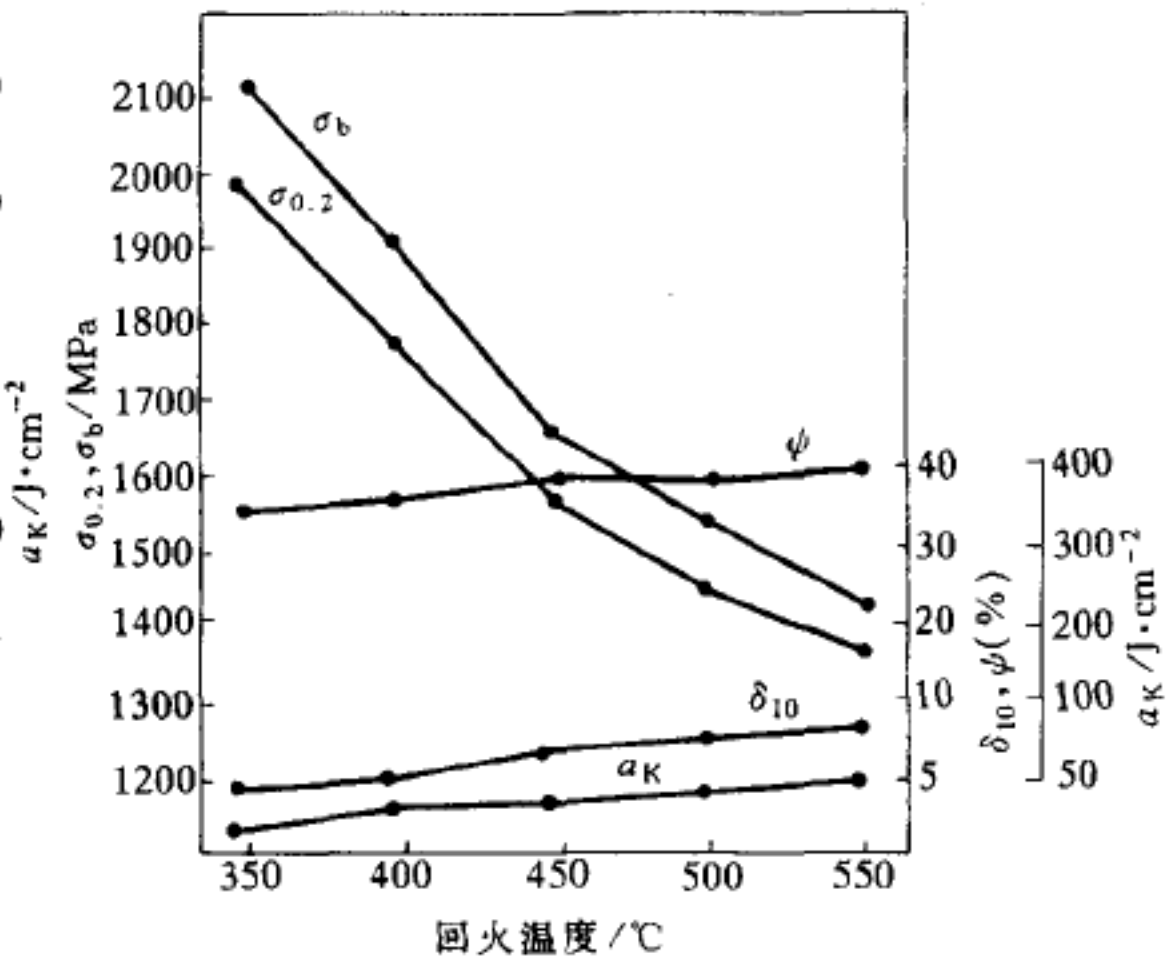


图 17-11 不同温度回火后的力学性能
55SiMnMoVNb 钢(880℃油淬)

17.3 弹簧的特殊热处理

1. 喷丸处理(表 17-31 ~ 表 17-33)

表 17-31 喷丸处理对 55Si2Mn 平板试样疲劳寿命的影响

表面状况	硬度 HRC		疲劳极限/MPa		
	未喷丸	喷丸后	未喷丸	喷丸后	增加率(%)
表面脱碳层深 0.12 ~ 0.15mm	30 ~ 32	39.5 ~ 44.5	474	903	90.3
表面经过研磨	42.5 ~ 44.5	—	858	—	—

注:喷丸规范:弹丸直径 0.4 ~ 0.6mm,转筒直径 500mm,转速 2250r/min,弹丸流量 100 ~ 120kg/min。

表 17-32 55Si2Mn 钢板弹簧喷丸及应力喷丸后的疲劳极限

试样厚度/mm	试样类型	疲劳极限/MPa		
		未喷丸	喷 丸	应力喷丸 ^①
13	带槽平板	363	461	784
10	平 板	343	686	833

注:55Si2Mn 热轧表面淬火、回火后的硬度为 40HRC。

① 试样在弯曲状态下喷丸,喷丸面受弯曲拉应力:784~882MPa。

表 17-33 棱边喷丸对 60Si2Mn 钢板弹簧疲劳寿命的影响

序号	组别	热处理工艺	脱碳层深度/mm	硬度 HRC	喷丸方案	断裂周次	疲劳寿命对比(%)
1	I	920℃ 保温 5min, 油冷, 540℃ 回火 50min	0.136	39~40	一般喷丸	107800	100
2				40	一般喷丸+棱边喷丸	161280	150
3				41~42	一般喷丸+棱边喷丸	160160	149
4	II	920℃ 保温 5min 油冷, 510℃ 回火 24min	0.097	44~45	一般喷丸	75880	100
5				43~44	一般喷丸	90440	
6				43	一般喷丸+棱边喷丸	183960	221
7				44~45	一般喷丸+棱边喷丸	95200	114
8				44~45	一般喷丸+棱边喷丸	144480	174
9				44~45	一般喷丸+棱边喷丸	85210	102
10				40~42	一般喷丸+棱边喷丸	201320	243
11				41	一般喷丸+棱边喷丸	129360	156

注:板簧尺寸:6mm×65mm×650mm,试验应力:1029MPa。

2. 稳定化处理(表 17-34)

表 17-34 弹簧钢的稳定化处理工艺

名 称	工 艺				作 用		用 途	
加荷时效 (强压处理)	将弹簧压(或拉)至各圈接触或指定高度($H_0 + 1.2F$),并 保持一定时间(12 ~ 48h)				1. 提高承受静载荷 或有限作用次数的交变 载荷能力 2. 保证工作时尺寸 稳定性		受静载或有限作用 次数的交变载荷的弹 簧,以压缩弹簧为主	
机械稳定时效 (立定处理)	将弹簧压(或拉)至各圈接触或指定高度($H_0 + 1.25F$), 重复 10 次以上				稳定尺寸		各种弹簧	
加温加荷 时效	将弹簧压缩(或拉伸)到最大工作载荷下高度 H_2 ,在一定 温度下保持一定时间一般进行两次,第一次在热处理之后, 第二次在表面处理之后。具体参数如下:				稳定尺寸		一般用于工作温度 超过 60℃的弹簧	
	工作温度 /℃	第一次时效		第二次时效				
		温度/℃	时间/h	温度/℃				时间/h
	≤ 60	120 ± 10	65Si2Mn WA ≥ 7 50CrVA、 碳钢 ≥ 2	①				65Si2Mn WA ≥ 5 50CrVA、 碳钢 ≥ 2
	> 60 ~ 100			100 ± 10				
	> 100 ~ 150	150 ± 10						
	> 150 ~ 180	180 ± 10						
	> 180 ~ 250	250 ± 10						

① 对于 65SiMn2WA 钢第二时效为室温下保持 48h。

第 18 章 滚动轴承的热处理

18.1 轴承钢的化学成分、物理化学性能

1. 轴承钢的化学成分(表 18-1)

表 18-1 轴承钢的化学成分

类别	钢号	化学成分(质量分数)(%)										退火状态交货时 的硬度值 HBW
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	其他	S	P		
铬 轴 承 钢	GCr6	1.05 ~ 1.15	0.20 ~ 0.40	0.15 ~ 0.35	0.40 ~ 0.70				≤0.020	≤0.027	179 ~ 207	
	GCr9	1.00 ~ 1.10	0.20 ~ 0.40	0.15 ~ 0.35	0.90 ~ 1.20				≤0.020	≤0.027	179 ~ 207	
	GCr9SiMn	1.00 ~ 1.10	0.90 ~ 1.20	0.40 ~ 0.70	0.90 ~ 1.20				≤0.020	≤0.027	179 ~ 207	
	GCr15	0.95 ~ 1.05	0.20 ~ 0.40	0.15 ~ 1.35	1.30 ~ 1.65				≤0.020	≤0.027	179 ~ 207	
	GCr15SiMn	0.95 ~ 1.05	0.90 ~ 1.20	0.40 ~ 0.65	1.30 ~ 1.65				≤0.020	≤0.027	179 ~ 207	
	G8Cr15	0.75 ~ 0.85	0.20 ~ 0.40	0.15 ~ 0.35	1.30 ~ 1.65				≤0.020	≤0.027	179 ~ 207	
无 铬 轴 承 钢	GSiMnV(RE)	0.95 ~ 1.10	1.10 ~ 1.30	0.55 ~ 0.80	≤0.30	≤0.30		V0.20 ~ 0.30 (RE0.10)	≤0.030	≤0.030		
	GSiMnMoV(RE)	0.95 ~ 1.10	0.75 ~ 1.05	0.40 ~ 0.65	≤0.30	≤0.30	0.20 ~ 0.40	V0.20 ~ 0.30 (RE0.10)	≤0.030	≤0.030		
	GMnMoV(RE)	0.95 ~ 1.07	1.10 ~ 1.40	0.15 ~ 0.40	≤0.30	≤0.30	0.40 ~ 0.60	V0.15 ~ 0.25 (RE0.10)	≤0.030	≤0.030		
	GSiMn(RE)	0.95 ~ 1.10	0.99 ~ 1.20	0.45 ~ 0.65	≤0.25	≤0.25	Cu ≤0.25	(RE0.10 ~ 0.15)	≤0.030	≤0.030		
渗 碳 轴 承 钢	15Mn	0.12 ~ 0.19	0.70 ~ 1.00	0.17 ~ 0.37	≤0.25	≤0.25			≤0.040	≤0.040	热轧 ≤163	
	20	0.17 ~ 0.24	0.35 ~ 0.65	0.17 ~ 0.37	≤0.25	≤0.25			≤0.040	≤0.040	热轧 ≤156	
	G20CrMo	0.17 ~ 0.23	0.65 ~ 0.95	0.20 ~ 0.35	0.35 ~ 0.65		0.08 ~ 0.15				≤229	
	G20CrNiMo	0.17 ~ 0.23	0.60 ~ 0.90	0.15 ~ 0.40	0.35 ~ 0.65	0.40 ~ 0.70	0.15 ~ 0.30				≤229	
	G20CrNi2Mo	0.17 ~ 0.23	0.40 ~ 0.70	0.15 ~ 0.40	0.35 ~ 0.65	1.60 ~ 2.00	0.20 ~ 0.30				≤229	
	G10CrNi3Mo	0.08 ~ 0.13	0.40 ~ 0.70	0.15 ~ 0.40	1.00 ~ 1.40	3.00 ~ 3.50	0.08 ~ 0.15				≤229	
	G20Cr2Ni4	0.17 ~ 0.23	0.30 ~ 0.60	0.15 ~ 0.40	1.25 ~ 1.75	3.25 ~ 3.75					≤241	
	G20Cr2Mn2Mo	0.17 ~ 0.23	1.30 ~ 1.60	0.15 ~ 0.40	1.70 ~ 2.00		0.20 ~ 0.30				≤229	

(续)

类别	钢号	化学成分(质量分数)(%)										退火状态交货时的硬度值 HBW
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	其他	S	P		
不 锈 轴 承 钢	9Cr18	0.90 ~ 1.00	≤0.80	≤0.80	17 ~ 19				≤0.030	≤0.035	197 ~ 241	
	9Cr18Mo	0.95 ~ 1.10	≤0.50	≤0.80	16 ~ 18		0.40 ~ 0.70		≤0.030	≤0.035	(φ > 16mm)	
	1Cr18Ni9Ti	≤0.12	≤2.00	≤1.00	17 ~ 19	8 ~ 11		Ti5(C-0.02) ~ 0.80	≤0.030	≤0.035		
	0Cr17Ni7Al	≤0.09	≤1.00	≤1.00	16 ~ 18	6.50 ~ 7.75	Cu≤0.50	Al0.75 ~ 1.50	≤0.030	≤0.035		
高 温 轴 承 钢	0Cr17Ni4Cu4Nb	≤0.07	≤1.00	≤1.00	15.50 ~ 17.50	3 ~ 5	Cu3 ~ 5	Nb0.15 ~ 0.45	≤0.030	≤0.035		
	Cr4Mo4V	0.75 ~ 0.85	≤0.35	≤0.35	3.75 ~ 4.25		4.0 ~ 4.5	V0.9 ~ 1.10	≤0.020	≤0.027	187 ~ 207	
	Cr14Mo4V	1.00 ~ 1.15	≤0.60	≤0.60	13.4 ~ 15.0		3.75 ~ 4.25	V0.1 ~ 0.2	≤0.030	≤0.030	197 ~ 241	
	W9Cr4V2Mo	0.70 ~ 0.80	≤0.40	≤0.40	3.8 ~ 4.4	W8.5 ~ 10.0	≤0.80	V1.3 ~ 1.7	≤0.020	≤0.027		
其 他 轴 承 钢	W18Cr4V	0.70 ~ 0.80	≤0.40	≤0.40	3.8 ~ 4.4	W17.5 ~ 19.0	≤0.30	V1.0 ~ 1.4	≤0.030	≤0.030	切削用钢 ≤255 压力用钢 ≤285	
	W6Mo5Cr4V2	0.80 ~ 0.90	≤0.40	≤0.40	3.8 ~ 4.4	W5.5 ~ 6.75	4.5 ~ 5.5	V1.75 ~ 2.2	≤0.030	≤0.030		
	50CrMnMo	0.50 ~ 0.60	1.20 ~ 1.60	0.25 ~ 0.60	0.60 ~ 0.90		0.15 ~ 0.30		≤0.030	≤0.030	197 ~ 241	
	60CrMnMoNi	0.55 ~ 0.65	0.75 ~ 1.00	0.20 ~ 0.35	0.40 ~ 0.60	0.40 ~ 0.70	0.12 ~ 0.25		≤0.040	≤0.040		
	37CrA	0.22 ~ 0.42	0.40 ~ 0.70	0.15 ~ 0.35	0.80 ~ 1.10	≤0.25		Cu ≤0.25	≤0.035	≤0.035		
	55SiMoVA	0.53 ~ 0.60	0.30 ~ 0.60	0.80 ~ 1.10	≤0.30		0.40 ~ 0.60	V0.15 ~ 0.25	≤0.025	≤0.025		
	65Mn	0.62 ~ 0.70	0.90 ~ 1.20	0.17 ~ 0.37	≤0.25				≤0.035	≤0.035	≤302(热轧)	
	30CrMo	0.26 ~ 0.34	0.40 ~ 0.70	0.17 ~ 0.37	0.80 ~ 1.10		0.15 ~ 0.25		≤0.035	≤0.035	≤229	
	30CrNiMo	0.28 ~ 0.33	0.70 ~ 0.90	0.20 ~ 0.35	0.40 ~ 0.60	0.40 ~ 0.70	0.15 ~ 0.25		≤0.040	≤0.035		
	20Ni2Mo	0.17 ~ 0.22	0.45 ~ 0.65	0.20 ~ 0.35		1.65 ~ 2.00	0.20 ~ 0.30		≤0.040	≤0.035		
	7Mn15Cr2Al3V2WMo	0.65 ~ 0.75	14.50 ~ 16.50	≤0.80	2 ~ 2.5	W0.50 ~ 0.80	0.5 ~ 0.8	V1.50 ~ 2.00 Al2.30 ~ 3.30	≤0.030	≤0.060	28 ~ 32HRC	
	GCrSiWV	0.95 ~ 1.05	0.40 ~ 0.60	0.70 ~ 0.90	1.30 ~ 1.60	W1.10 ~ 1.40		V0.20 ~ 0.35	≤0.020	≤0.027	197 ~ 217	

2. 轴承钢的特点和应用(表 18-2 和表 18-3)

表 18-2 轴承钢的性能特点与用途

钢 号	性 能 特 点	用 途 举 例
高碳铬轴承钢		
GCr4	低铬轴承钢,耐磨性比相同碳含量的碳工钢高,冷加工塑性变形和切削加工性能尚好,有回火脆性倾向	用作一般载荷不大、形状简单的机械转动轴上的钢球和滚子
GCr15	高碳铬轴承钢的代表钢种、综合性能良好,淬火与回火后具有高而均匀的硬度,良好的耐磨性和高的接触疲劳寿命,热加工变形性能和切削加工性能均好,但焊接性差,对白点形成较敏感,有回火脆性倾向	用于制造壁厚 $\leq 12\text{mm}$ 、外径 $\leq 250\text{mm}$ 的各种轴承套圈,也用作尺寸范围较宽的滚动体,如钢球、圆锥滚子、圆柱滚子、球面滚子、滚针等;还用于制造模具、精密量具以及其他要求高耐磨性、高弹性极限和高接触疲劳强度的机械零件
GCr15SiMn	在 GCr15 钢的基础上适当增加硅、锰含量,其淬透性、弹性极限、耐磨性均有明显提高,冷加工塑性中等,切削加工性能稍差,焊接性能不好,对白点形成较敏感,有回火脆性倾向	用于制造大尺寸的轴承套圈、钢球、圆锥滚子、圆柱滚子、球面滚子等,轴承零件的工作温度小于 180°C ;还用于制造模具、量具、丝锥及其他要求硬度高且耐磨的零部件
GCr15SiMo	在 GCr15 钢的基础上提高硅含量,并添加钼而开发的新型轴承钢。综合性能良好,淬透性高,耐磨性好,接触疲劳寿命高,其他性能与 GCr15SiMn 相近	用于制造大尺寸的轴承套圈、滚珠、滚柱,还用于制造模具、精密量具以及其他要求硬度高且耐磨的零部件
GCr18Mo	相当于瑞典 SKF24 轴承钢。是在 GCr15 钢的基础上加入钼,并适当提高铬含量,从而提高了钢的淬透性。其他性能与 GCr15 钢相近	用于制造各种轴承套圈,壁厚从 $\leq 16\text{mm}$ 增加到 $\leq 20\text{mm}$,扩大了使用范围;其他用途和 GCr15 钢基本相同
渗碳轴承钢		
G20CrMo	低合金渗碳钢,渗碳后表面硬度较高,耐磨性较好,而心部硬度低,韧性好,适于制作耐冲击载荷的轴承及零部件	常用作汽车、拖拉机的承受冲击载荷的滚子轴承,也用作汽车齿轮、活塞杆、螺栓等
G20CrNiMo	有良好的塑性、韧性和强度,渗碳或碳氮共渗后表面有相当高的硬度,耐磨性好,接触疲劳寿命明显优于 GCr15 钢,而心部碳含量低,有足够的韧性承受冲击载荷	制作耐冲击载荷轴承的良好材料,用作承受冲击载荷的汽车轴承和中小型轴承,也用作汽车、拖拉机齿轮及牙轮钻头的牙爪和牙轮体
G20CrNi2Mo	渗碳后表面硬度高,耐磨性好,具有中等表面硬化性,心部韧性好,能耐冲击载荷,钢的冷热加工塑性较好,能加工成棒、板、带及无缝钢管	用于承受较高冲击载荷的滚子轴承,如铁路货车轴承套圈和滚子,也用作汽车齿轮、活塞杆、万向接轴、圆头螺栓等
G10CrNi3Mo	渗碳后表面碳含量高,具有高硬度,耐磨性好,而心部碳含量低,韧性好,能耐冲击载荷	用于承受冲击载荷较高的大型滚子轴承,如轧钢机轴承等

(续)

钢 号	性 能 特 点	用 途 举 例
渗碳轴承钢		
G20Cr2Ni4A	常用的渗碳结构钢用于制作轴承。渗碳后表面有相当高的硬度、耐磨性和接触疲劳强度,而心部韧性好,可耐强烈冲击载荷,焊接性中等,有回火脆性倾向,对白点形成较敏感	制作耐冲击载荷的大型轴承,如轧钢机轴承等,也用作其他大型渗碳件,如大型齿轮、轴等,还可用于制造要求强韧性高的调质件
G20Cr2Mn2MoA	渗碳后表面硬度高,而心部韧性好,可耐强烈冲击载荷。与 G20Cr2Ni4A 相比,渗碳速度快,渗碳层较易形成粗大碳化物,不易扩散消除	用于高冲击载荷条件下工作的特大型和大、中型轴承零件,以及轴、齿轮等
不锈钢轴承钢		
9Cr18 9Cr18Mo	高碳马氏体型不锈钢用于制造轴承,淬火后有较高的硬度和耐磨性,在大气、水以及某些酸类和盐类的水溶液中具有优良的不锈与耐腐蚀性能	用于制造在海水、河水、蒸馏水,以及海洋性腐蚀介质中工作的轴承,工作温度可达 253~350℃;还可用作某些仪器、仪表上的微型轴承
1Cr18Ni9Ti	奥氏体型不锈钢用于制造轴承,具有优良的抗腐蚀性能,热加工和冷加工性能优良,焊接性能很好,过热敏感性也低	用于制造耐腐蚀套圈、钢球及保持器等,还可用作防磁轴承,经渗氮处理后,可用于高温、高真空、低载荷、高转速条件下工作的轴承

表 18-3 常用轴承钢的使用范围

钢 号	使 用 范 围/mm						
	套 圈	钢 球 (直径)	滚 子				
			圆 锥	圆 柱	球 面	滚 针	螺 旋
GCr6		< 13.5	$D \leq 10.0$ $L \leq 20$	$D \leq 9.4$	$D \leq 0.2$	$D < 6$	—
GCr9		> 13.5 ~ 25.0	$D > 10 \sim 18$ $L > 20 \sim 31$	$D > 9.4 \sim 17.0$	$D > 9.2 \sim 17.0$	—	—
GCr15 GCr9SiMn	壁厚 ≤ 12	> 25.0 ~ 50.0	≤ 22	≤ 22	≤ 22	—	—
GCr15SiMn	壁厚 > 12	> 50	> 22	> 22	< 22	—	—
37CrA	—	—	—	—	—	—	各种尺寸
9Cr18 9Cr18Mo Cr4Mo4V W18Cr4V W9Cr4V2Mo	各种尺寸	各种尺寸	各种尺寸	各种尺寸	各种尺寸	—	—
55SiMoV	各种尺寸	各种尺寸	—	各种尺寸	—	—	—
5CrMnMo	外径 > 2000mm 的套圈	—	—	—	—	—	—

注: D 为直径, L 为长度。

3. 物理性能(表 18-4 和表 18-5)

表 18-4 常用轴承钢的临界点

钢 号	$A_{c1}/^{\circ}\text{C}$	$A_{c3} (A_{cm})/^{\circ}\text{C}$	$A_{r1}/^{\circ}\text{C}$	$A_{r3}/^{\circ}\text{C}$	$M_s/^{\circ}\text{C}$
GCr9	730	887	690	721	
GCr15	760	(900)	695	707	
GCr15SiMn	770	872	708		200
GMnSiV(RE)	740	(790)	680	730	
GSiMnMoV(RE)	740	800	681	727	
GMnMoV	743	(873)	677	698	
20Cr2Ni4A	685	775	585	630	305
G8Cr15	752	824	684	780	240
GSiMn(RE)	745		674		150
20Cr2Mn2SiMoA	725	835	615	700	305
GCrSiWV	765		692		
Cr4Mo4V	724	840	720	778	130
Cr14Mo4V	856	(915)	722	777	
9Cr18Mo	840		715		

表 18-5 常用轴承钢的物理性能

钢 号	线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$						弹性模量 E/MPa
	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	
GCr9	13.0	13.9		15.0		15.5	215000
GCr15	13.29	13.63	13.76	14.11	14.97	15.33	216000
GSiMnV(RE)	13.17	13.33	13.52	13.74	13.94	14.09	215000
GSiMnMoV(RE)	12.67	12.77	13.03	13.15	13.18	13.46	214480
G8Cr15	12.0	12.8	13.4	13.9	14.1	14.6	204000
GCrSiWV	10.24	11.95	12.74	13.2			226300
Cr4Mo4V		11.2	12.0	12.5	13.0	13.3	
Cr14Mo4V		10.09	11.3	11.65	11.95	12.1	
9Cr18Mo	10.5	11.0	11.0		12.0		

4. 中外轴承钢号对照(表 18-6 和表 18-7)

表 18-6 中国与亚太各国以及国际标准的轴承钢钢号近似对照

No.	中国 GB	日本 JIS	韩国 KS	美 国		国际标准化组织 ISO
				ASTM/AISI	UNS	
高碳铬轴承钢						
1	GCr6	—	—	50100 E50100	G50986	—
2	GCr9	SUJ1	STB1	E51100	G51986	—
3	GCr9SiMn	SUJ3	STB3	A485 Cr1	—	100CrMnSi4-4(B2)
4	GCr15	SUJ2	STB2	E52100	G52986	100Cr6(B1)
5	GCr15SiMn	—	—	—	—	100CrMnSi6-4(B3)
渗碳轴承钢						
6	G20CrMo	—	—	A534 4118H	—	~ 20MnCrMo4-2(B27)
7	G20CrNiMo	SNCM220	SNCM220	A534 8620H	—	20NiCrMo2(B28)
8	G20CrNi2Mo	SNCM420	SNCM420	A534 4320H	-	20NiCrMo7(B29)
9	G20Cr2Ni4	—	—	—	—	~ 18NiCrMo14-6(B31)
10	G10CrNi3Mo	—	—	A534 9310H	—	—

(续)

No.	中国 GB	日本 JIS	韩国 KS	美 国		国际标准化组织 ISO
				ASTM/AISI	UNS	
不锈轴承钢						
11	9Cr18	SUS 440C	STS440C	—	—	—
12	9Cr18Mo	SUS440C	STS440C	A756 440C	—	X108CrMo17(B52)

表 18-7 中国与欧洲各国的轴承钢钢号近似对照

NO.	中国 GB	德 国		法国 NF	俄罗斯 ГОСТ	瑞典 ^① SKF	英国 BS
		DIN	W-Nr				
高碳铬轴承钢							
1	GCr6	100Cr2(W1)	1.3501	100C2	ШХ6	SKF9	—
2	GCr9	105Cr4(W2)	1.3503	100C5	ШХ9	SKF13	—
3	GCr9SiMn	—	—	—	—	SKF1	—
4	GCr15	100Cr6(W3)	1.3505	100C6	ШХ15	SKF3	535A99
5	GCr15SiMn	100CrMn6(W4)	1.3502	100CM6	ШХ15ГC	SKF2	—
渗碳轴承钢							
6	G20CrMo	20MoCr4	1.7321	—	—	—	—
7	G20CrNiMo	21NiCrMo2	1.6523	20NCD2	—	SKF152	805A20
8	G20CrNi2Mo	—	—	20NCD7	20XH2M (20XHM)	—	—
9	G20Cr2Ni4	—	—	—	20X2H4A	—	—
10	G10CrNi3Mo	—	—	—	—	—	832H13
不锈轴承钢							
11	9Cr18	—	—	—	95X18	—	—
12	9Cr18Mo	X102CrMo17	1.3543	Z100CD17	—	SKF577 STORA577	—

① SKF 系轴承钢国际名牌产品。

18.2 轴承热处理工艺和性能

1. 铬轴承钢热处理工艺和性能

(1) 热处理工艺

1) 退火(表 18-8 ~ 表 18-10,图 18-1 ~ 图 18-5)

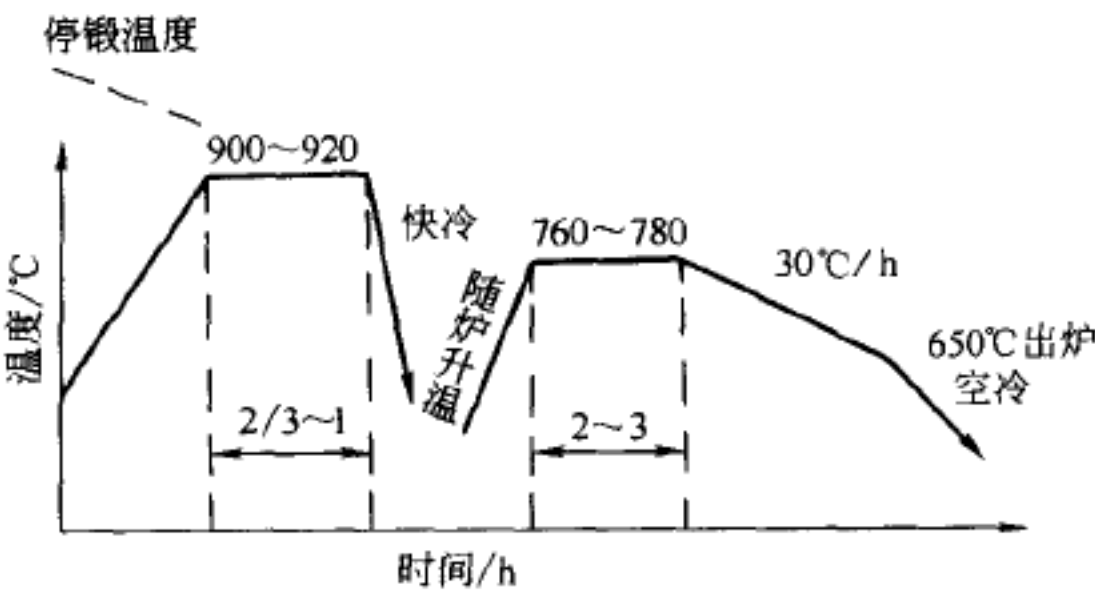


图 18-1 快速球化退火工艺

表 18-8 高碳铬轴承钢退火工艺规范

工 艺	退火温度/℃	退火时间/h	等温温度/℃	等温时间/h	冷却方式
一般球化退火	780 ~ 810	3 ~ 6	—	—	炉冷至 650℃ 出炉空冷
等温球化退火	780 ~ 810	3 ~ 6	680 ~ 720	4 ~ 6	
去应力退火	550 ~ 650	3 ~ 5	—	—	炉冷
再结晶退火	650 ~ 720	2 ~ 8	—	—	

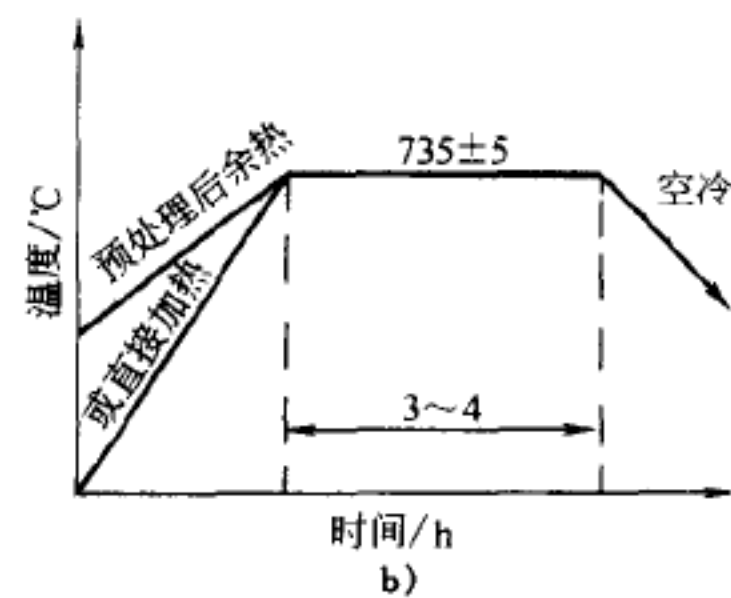
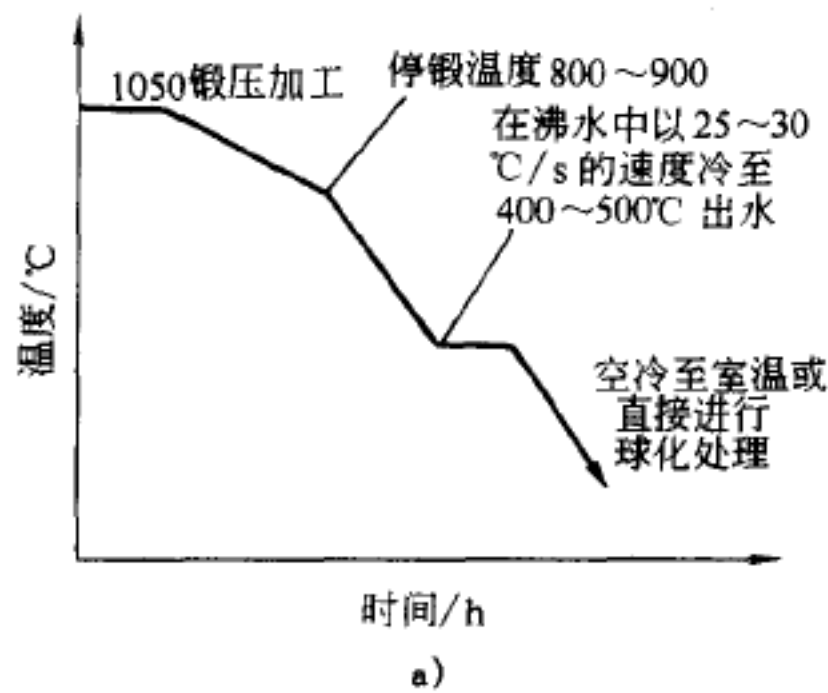


图 18-2 锻造余热淬火加高温回火的工艺曲线

a) 锻造余热沸水淬火 b) 高温回火

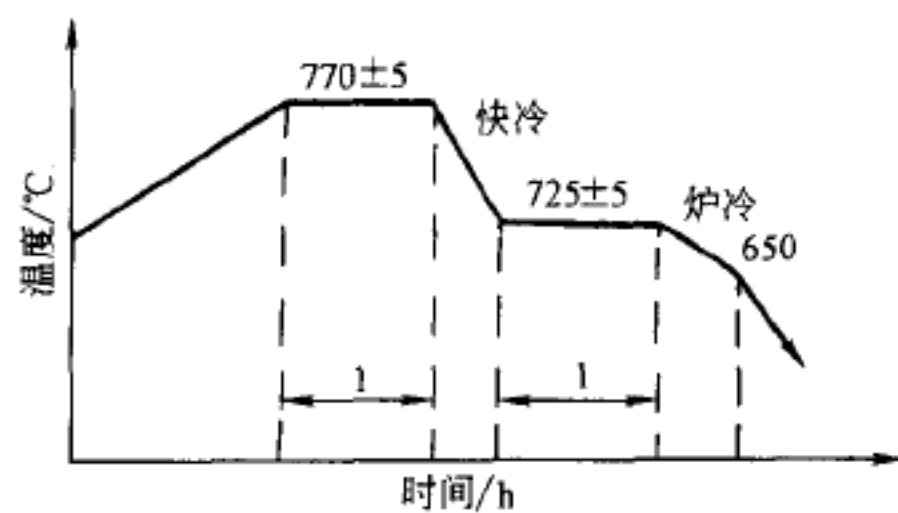
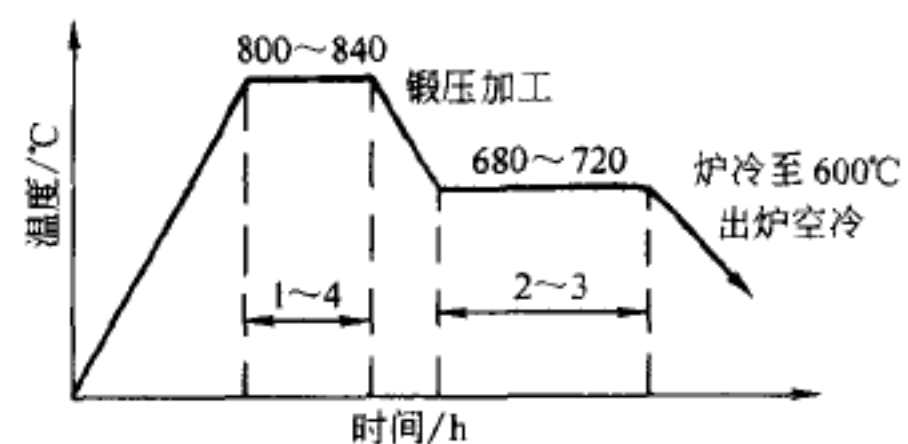
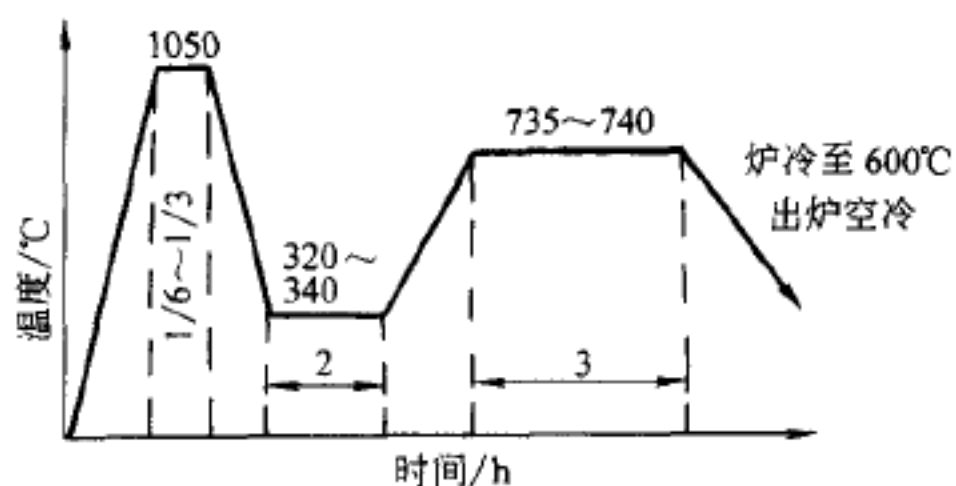
图 18-3 经沸水淬火后锻件
进行快速等温退火工艺

图 18-4 亚温锻后热处理细化工艺

图 18-5 高温固溶等温淬火
加高温回火工艺表 18-9 退火组织中碳化物颗粒大小
和均匀性对轴承接触疲劳寿命的影响

原始组织	淬火温度 /℃	平均寿命 /h	寿命波动范围 /h	稳定系数 ^①
均匀细小粒 状珠光体	820	396	198 ~ 561	2.8
	840	811	354 ~ 1941	5.4
	860	581	401 ~ 818	2.0
不均匀粗粒 状珠光体	820	340	89 ~ 489	5.4
	840	505	186 ~ 1408	7.6
	860	558	413 ~ 870	2.0

① 稳定系数——最长与最短寿命之比。

表 18-10 退火组织检查、退火缺陷及防止办法

检查项目	技术要求	缺陷名称		产生原因	补救办法	防止措施
脱碳层	不超过车削余量的 2/3	脱碳层超过规定深度		1. 原材料锻造或正火脱碳严重 2. 炉子密封性差,或在氧化性气氛中加热,退火温度高,保温时间长,或正火、重复退火	改其他型号或报废	1. 加强对原材料和锻件的脱碳控制 2. 正确执行工艺,防止跑温 3. 尽可能不进行正火和不重复退火 4. 提高炉子密封性,在中性火焰炉和保护气氛炉中加热
显微组织	1. 退火组织应为细小,均匀分布的球化组织,按 JB/T 1255—2001 标准中第 1 级别图评定,2~4 级为合格组织,不允许有第 1 级欠热、第 5 级碳化物颗粒不均匀和第 6 级过热组织 2. 碳化物网按第 3 级别图 ≤ 2.5 级为合格	欠热	点状珠光体加部分细片状珠光体	1. 加热温度低或保温时间不足 2. 原材料组织不均匀 3. 装炉量多,炉子的均温性差,或在正常工艺下,还有部分(局部位置)工件加热不足,或保温时间不够 4. 加热温度偏高,冷却速度过快	根据不同缺陷调整工艺进行二次退火	1. 合理制定工艺,严格执行工艺 2. 改善炉温均匀性 3. 装炉量合理,放置要均匀 4. 严格控制原材料及锻件质量 5. 控制冷却速度不宜太快
		过热	碳化物颗粒大小不一,分布不均匀,粒状珠光体加部分粗片状珠光体	1. 加热温度过高,或在上限温度下保温时间过长 2. 原材料组织不均匀 3. 装炉量多,炉温均匀性差,或在正常工艺下,仍有部分工件加热温度过高,保温时间过长	先正火而后调整工艺,进行快速退火或正常退火	1. 合理制定工艺,严格执行工艺 2. 改善炉温均匀性 3. 装炉量合理,摆放均匀 4. 严格控制原材料和锻件质量
		粗大颗粒碳化物		1. 锻造组织有粗大片状珠光体 2. 退火温度偏高,冷速慢 3. 原材料碳化物不均匀(网状,带状) 4. 重复退火	先正火再进行第一次退火	1. 严格控制原材料和锻件质量 2. 尽量不进行重复退火,更不能进行多次退火
		网状碳化物超过规定级别		1. 锻造组织有严重碳化物网、退火时无法消除 2. 退火温度过高,同时冷却太慢	先正火再进行第一次退火	1. 严格控制锻造组织 2. 防止退火跑温和冷却太慢
硬度	GCr15: 170~207HBW GCr15SiMn 179~217HBW	太硬		1. 组织欠热,有片状珠光体残留 2. 冷速太快,产生密集点状珠光体	调整工艺进行二次退火	措施与组织不合格相同
		太软		1. 组织过热 2. 多次退火或冷速太慢	先进行正火然后进行退火	

2) 正火(表 18-11 和表 18-12)

表 18-11 铬轴承钢锻件的正火工艺

正火目的	钢号	正火工艺		
		温度 /℃	保温时间 /min	冷却方法
消除和减少粗大网状碳化物	GCr15	930 ~ 950	40 ~ 60	根据零件的有效厚度和正火温度正确选择正火后冷却条件,以免再次析出网状碳化物或增大碳化物颗粒及裂纹等缺陷。一般冷却速度 > 50℃/min。冷却方法有: 1. 分散空冷 2. 强制吹风 3. 喷雾冷却 4. 乳化液中(70 ~ 100℃)或油中循环冷却 5. 70 ~ 80℃水中冷却
	GCr15SiMn	890 ~ 920		
消除较粗网状碳化物,改善锻造后晶粒度以及消除粗片状珠光体	GCr15	900 ~ 920	40 ~ 60	
	GCr15SiMn	870 ~ 890		
细化组织和增加同一批零件退火组织的均匀性	GCr15	860 ~ 900	40 ~ 60	
	GCr15SiMn	840 ~ 860		
改善退火组织中粗大碳化物颗粒	GCr15	950 ~ 980	40 ~ 60	
	GCr15SiMn	940 ~ 960		

表 18-12 铬轴承钢正火时常见缺陷及防止方法

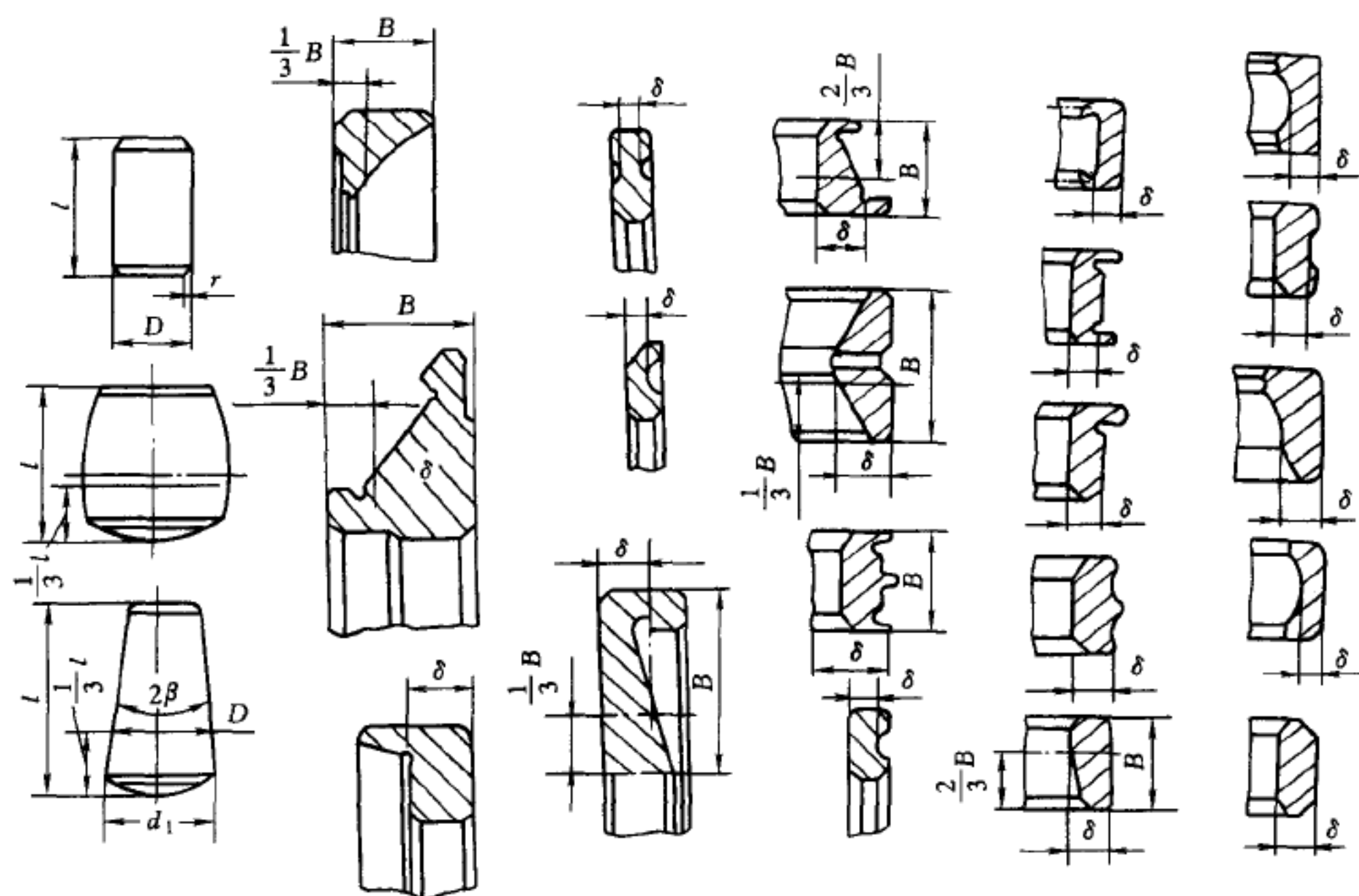
缺陷名称	产生原因	防止方法
碳化物网大于标准规定级别	1. 原材料的碳化物网严重 2. 正火温度偏低或保温时间短 3. 正火后冷却速度太慢	1. 加强原材料检验 2. 正确选择正火温度和保温时间 3. 加快冷速、合理选择冷却方法
脱碳严重,超过机加工余量	1. 锻件本身脱碳严重 2. 在氧化气氛炉中加热 3. 正火温度高,装炉量多,保温时间长	1. 加强原材料脱碳检验,严格执行锻造加热规范 2. 调整加热炉的火焰为还原性的,或采用保护气氛加热 3. 正确选择正火加热温度与保温时间
裂纹	1. 锻造时遗留在锻件上 2. 冷速太快或出冷却介质温度低	1. 加强对锻件正火前的裂纹检查 2. 严格执行正火工艺,出冷却介质温度不应低于 400 ~ 500℃,并及时进行退火或回火

3) 淬火(表 18-13 ~ 表 18-17,图 18-6 ~ 图 18-11)

表 18-13 GCr15 和 GCr15SiMn 钢在电炉和盐炉中加热时的保温时间

钢号	零件有效厚度 ^① /mm	淬火加热温度 /℃	保温时间 /min	
			盐浴炉	电炉
GCr15	< 3	835 ~ 840	3 ~ 5	6
	3 ~ 5	840 ~ 845	5 ~ 7	6 ~ 8
	5 ~ 8	845 ~ 850	7 ~ 9	8 ~ 12
	8 ~ 12	850 ~ 855	9 ~ 12	12 ~ 15
	> 12	850 ~ 860	12 ~ 15	15 ~ 20
GCr15SiMn	10 ~ 13	820 ~ 825	10 ~ 12	14 ~ 16
	13 ~ 16	825 ~ 830	12 ~ 15	16 ~ 18
	17 ~ 19	825 ~ 830	15 ~ 19	18 ~ 20
	19 ~ 23	830	19 ~ 22	20 ~ 24
	24 ~ 26	830	22 ~ 24	24 ~ 26
	26 ~ 30	835	24 ~ 26	26 ~ 28
	30 ~ 33	835	24 ~ 26	28 ~ 29
	34 ~ 36	835	—	29 ~ 31
	36 ~ 40	840	—	31 ~ 33
	40 ~ 42	840	—	32 ~ 33
	42 ~ 45	840	—	33 ~ 34
	45 ~ 50	840	—	34 ~ 36

① 零件有效厚度计算见图 18-6。

图 18-6 轴承零件的有效厚度(δ)计算

δ —有效壁厚(mm) B —宽度(mm) l —长度(mm) D —滚子的有效直径(mm)

表 18-14 GCr15 钢制 308 轴承套圈感应热处理工艺

轴承零件	中频感应淬火				工 频 感 应 回 火					
	推料节拍 /件·min ⁻¹	加热温度 /℃	保温时间 /s	总加热时间 /s	推料节拍 /件·min ⁻¹	电 参 数		加热温度 /℃	保温时间 /s	总加热时间 /s
						电压/V	电流/A			
308/01	9.5	870 ± 5	120	330	9.5	23.5 ± 0.3	300	215 ± 5	150	300
308/02	9.5	870 ± 5	120	330	9.5	15.5 ± 0.3	300	215 ± 5	150	300

表 18-15 钢球淬火加热温度和保温时间

钢球直径 /mm	重 量 /g	加热温度 /℃	感应加热时间 /s	电阻炉保温时间 /min	生 产 率 /kg·h ⁻¹
20.89	37.0	840 ± 5	16	10 ~ 13	290 ~ 310
23.27	52.0	840 ± 5	17.3	12 ~ 15	345 ~ 375
28.85	99.0	845 ± 5	19.3	15 ~ 18	480 ~ 530
30.45	117.0	850 ± 5	21	15 ~ 18	490 ~ 535
36.97	207.0	855 ± 5	30	18 ~ 21	495 ~ 560

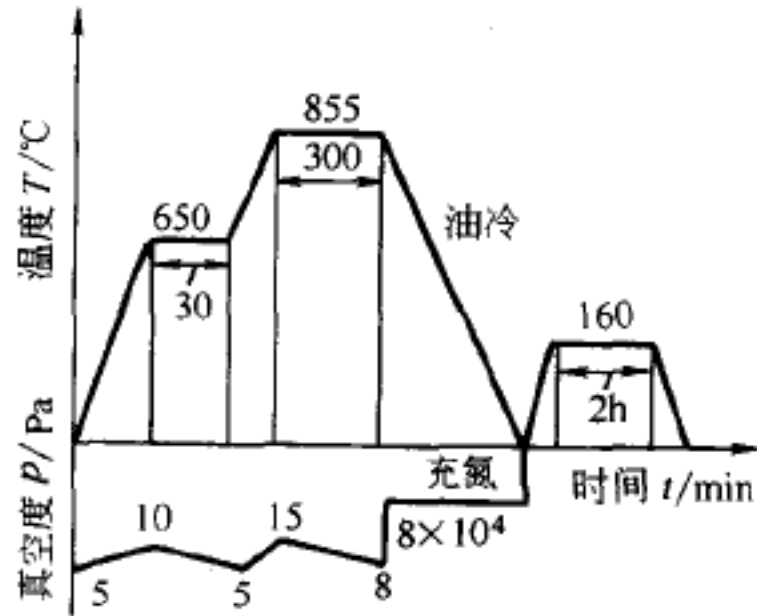


图 18-7 GCr15 钢真空淬火工艺曲线

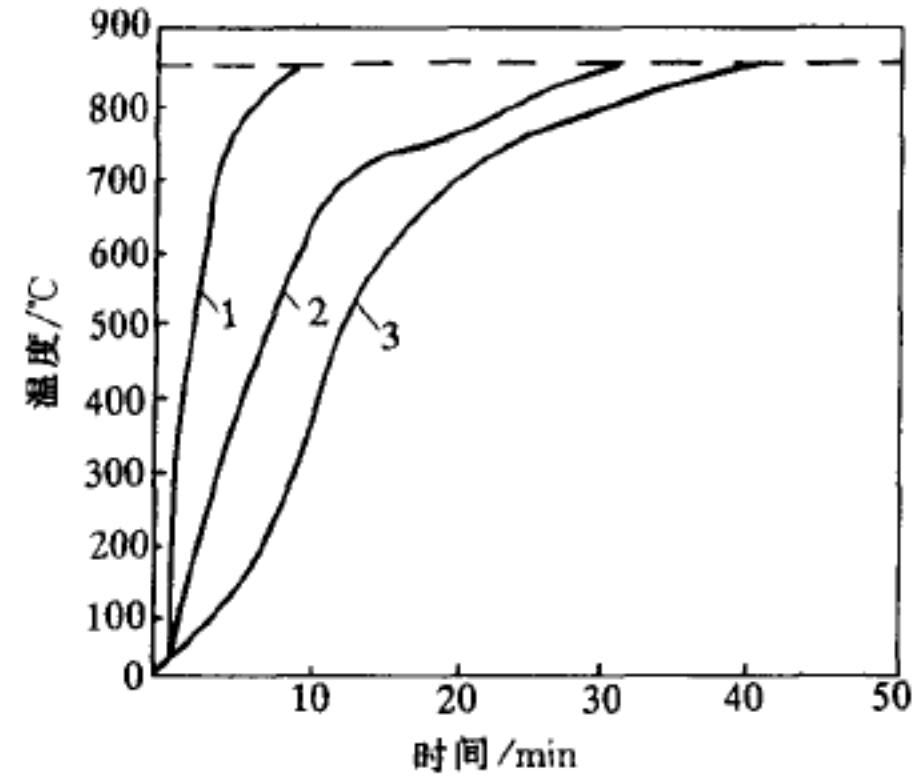


图 18-8 GCr15 钢 50mm × 100mm 试样在不同介质中的加热速度

1—盐浴中加热 2—空气炉中加热 3—真空中加热

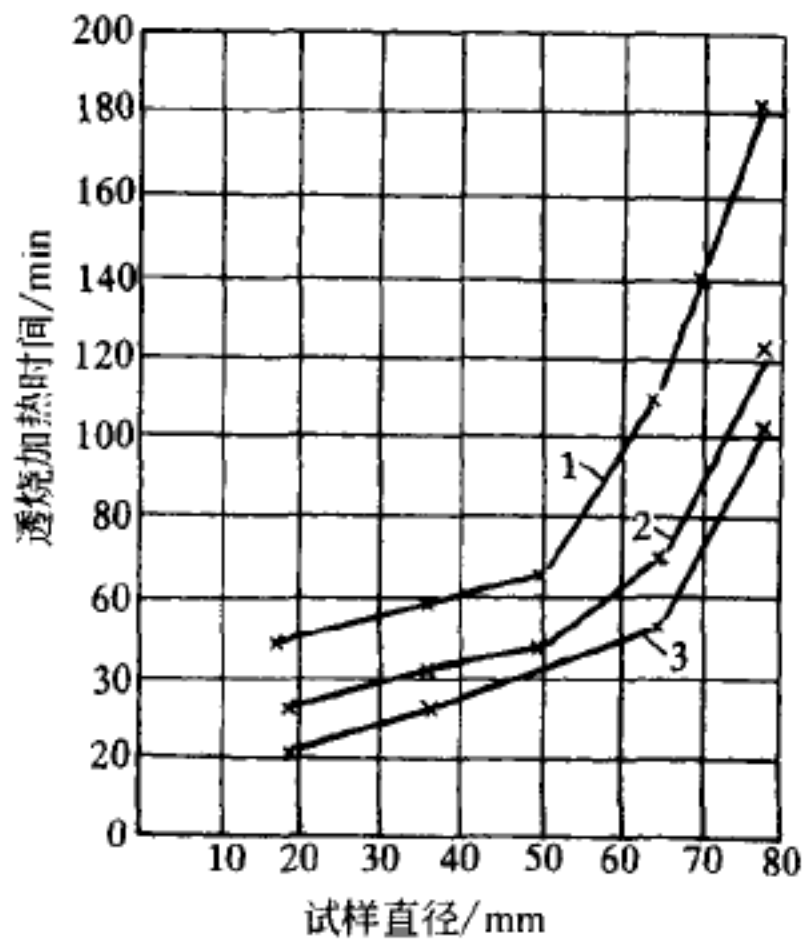


图 18-9 不同直径的 GCr15 钢试样的加热时间
1—600°C 预热时的加热时间 2—从室温直接加热到 850°C 的加热时间 3—经 600°C 预热，然后继续加热到 850°C 时的加热时间

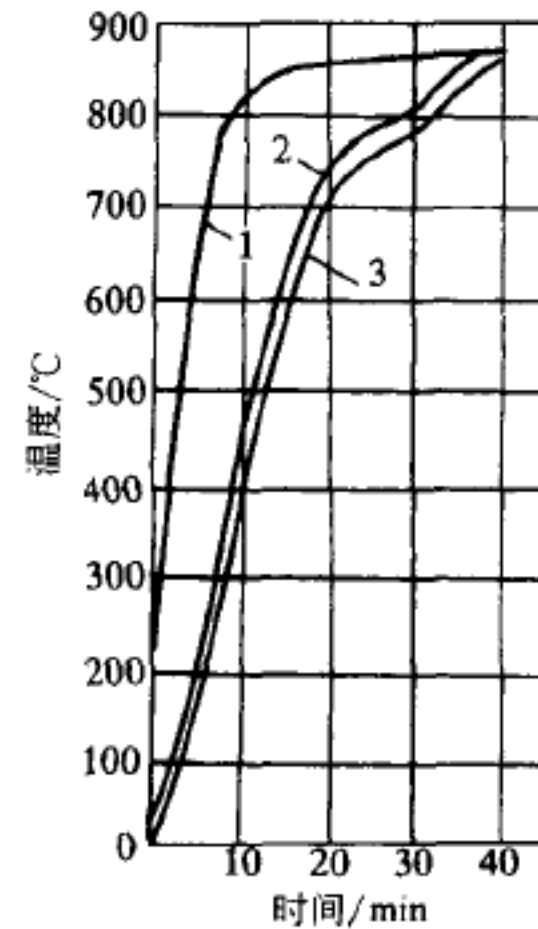


图 18-10 GCr15 钢 50mm × 100mm 试样 850°C 加热时的表面和心部升温曲线

1—炉温 2—表面温度 3—心部温度

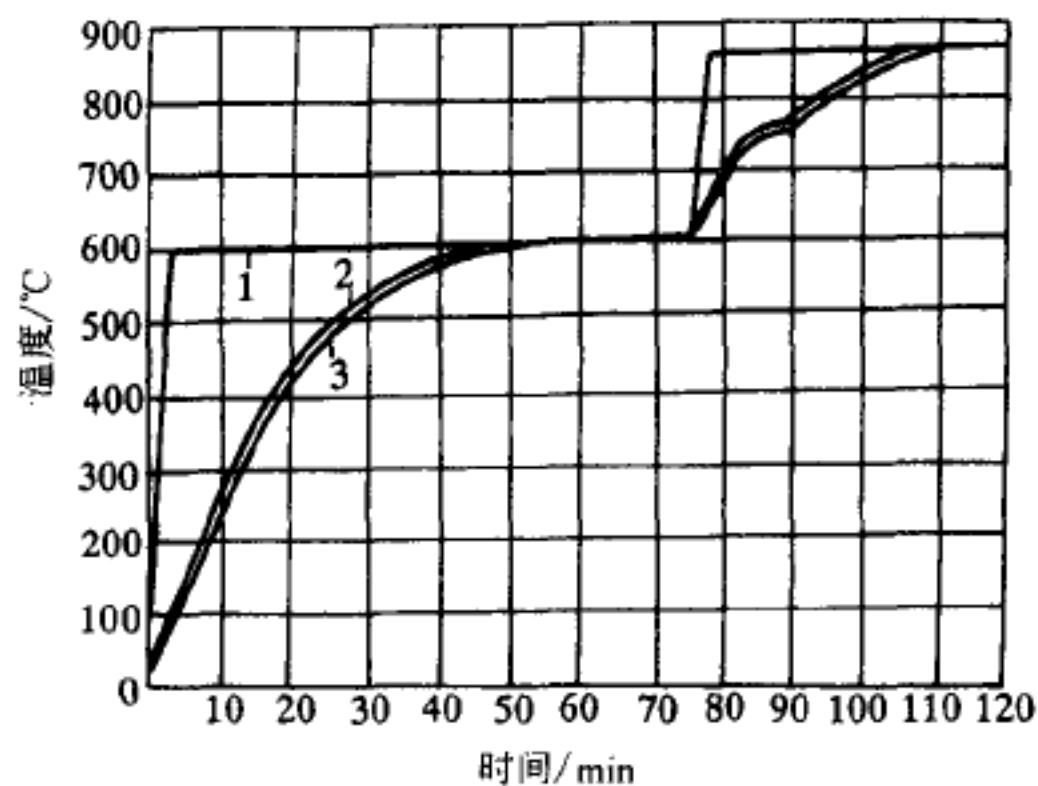


图 18-11 GCr15 钢 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 试样在真空中经 600°C 预热后加热到 850°C 的表面和心部升温曲线
1—炉温 2—表面温度 3—心部温度

表 18-16 各种淬火介质应用情况

淬火介质名称	冷却的轴承零件和尺寸范围
L-AN15 和 L-ANN32 (10 号和 20 号机械油)	1. GCr15 钢制直径小于 $\phi 12\text{mm}$ 的滚动体 2. GCr15SiMn 钢球 3. GCr15 钢制壁厚小于 12mm 的套圈
10% ~ 22% (质量分数) 碳酸钠水溶液	GCr15 制直径 12.7 ~ 50mm 的滚动体
KZ—1, PZ—1A 和 PZ—1B	冷却的零件和尺寸范围与使用 10 号和 20 号机械油的相同, 但其对零件的淬硬性 和淬透性以及畸变均优于使用 10 号和 20 号机械油冷却的零件
1 号高速淬火油	GCr15 钢制有效壁厚 13.5mm 以下的套圈使用
PZ—2A	GCr15 钢制直径 25mm 以下滚动体和有效壁厚 15mm 以下的套圈
GZ—1 高速淬火油	GCr15 钢制壁厚 $\leq 16\text{mm}$ 的套圈和直径 32mm 的滚子使用
快速淬火油	GCr15 钢制壁厚小于 19mm 和 $\phi 20 \sim \phi 30\text{mm}$ 滚子使用
光亮淬火油 (GZ—1 和 GZ—2)	适用于保护气体加热的中小截面轴承零件
快速光亮淬火油	适用于保护气体加热的较大截面轴承零件
真空淬火油 (ZZ—1 和 ZZ—2)	适用于在真空炉中加热的 GCr15 钢制的轴承零件
光亮等温 (分级) 淬火油 (DFZ—A 和 DFE—S)	适用于 GCr15 钢制轴承套圈的等温和分级淬火, 而 DFE-S 油除其使用温度为 100 ~ 150℃ 外, 还可用于外径 150mm 以下, 有效壁厚 5.5mm 以下的薄壁套圈淬冷

表 18-17 轴承零件常用的淬火冷却方式与方法

零件名称	直径、壁厚 /mm	淬火冷却的方式与方法	淬火介质温度 /℃
滚动体	大中小型滚子和球	自动摇筐、滚筒、溜球斜板和振动导板等	油 30 ~ 60 水溶液 20 ~ 40
中小型套圈	小于 200	手帘, 自动摇筐、强力搅动油、喷油冷却、振动淬火机 等	油 30 ~ 60
大型套圈	200 ~ 400	手帘式旋转、淬火机和吊架帘动, 同时喷油冷却	油 30 ~ 60
特大型套圈和滚子	> 1000 薄壁套圈 $\phi 40 \sim \phi 1000$ 套圈滚子	吊架机动冷却, 同时吹气搅油, 旋转淬火机冷却, 同 时吹气搅油吊架机动冷却, 同时吹气搅油	油温 < 70
薄壁套圈	< 8	在热油中冷却后, 即放入低温油中冷却	热油 130 ~ 170 低温油 30 ~ 80
超轻、特轻套圈	—	先在高温油中冷至油温后, 放入压模中冷至 30 ~ 40℃ 时脱模, 或将加热与保温的套圈直接放入压模中 进行油冷	低温油 30 ~ 60

4) 深冷处理 (表 18-18、图 18-12 和图 18-13)

表 18-18 深冷处理温度对多次冲击疲劳的影响

热 处 理 规 范	多次冲击疲劳寿命/min			
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次
820℃ 油淬, 回火	85	145	55	95
820℃ 油淬, -50℃ 深冷处理, 回火	140	70	—	105
820℃ 油淬, -80℃ 深冷处理, 回火	145	70	220	145
820℃ 油淬, -183℃ 深冷处理, 回火	60	45	40	50

注: 试验钢号为 GCr15, 试样形状为环状, 外径 52.5mm, 内径 44.80mm, 宽度 15.2mm, 在直径方向进行冲击, 冲击能量为 6.08N·m, 208 次/min。

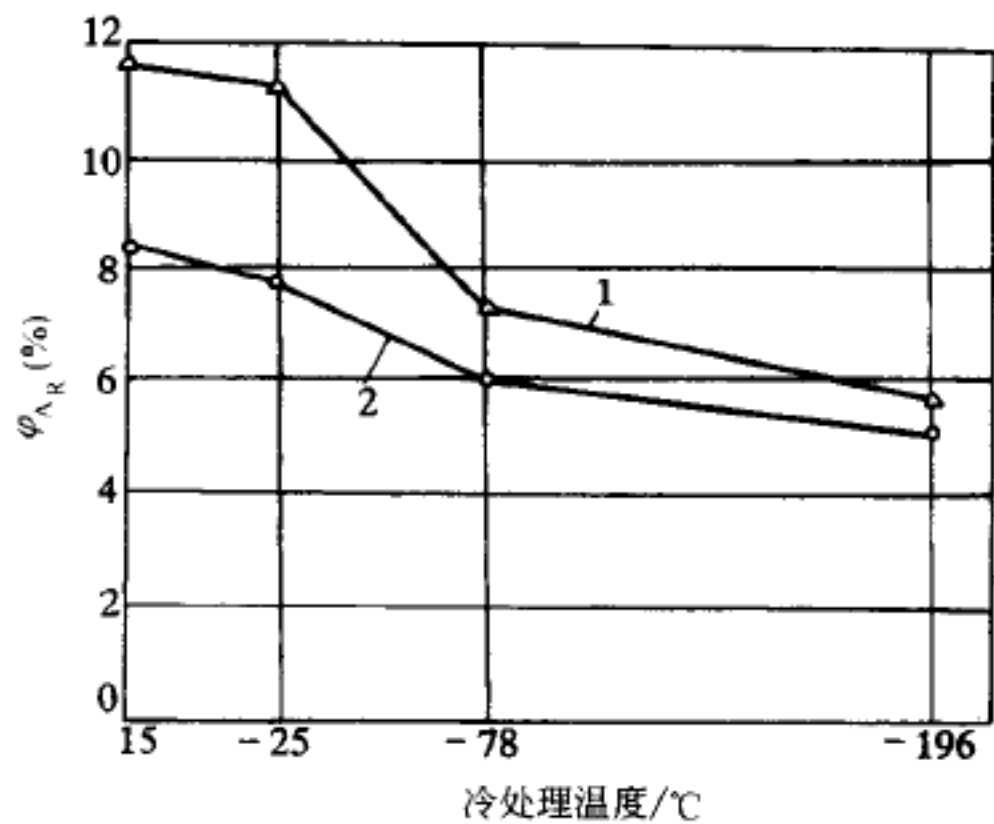


图 18-12 GCr15、GCr15SiMn 钢深冷处理温度对残留奥氏体含量的影响
1—GCr15,850℃ 淬火
2—GCr15SiMn,830℃ 淬火

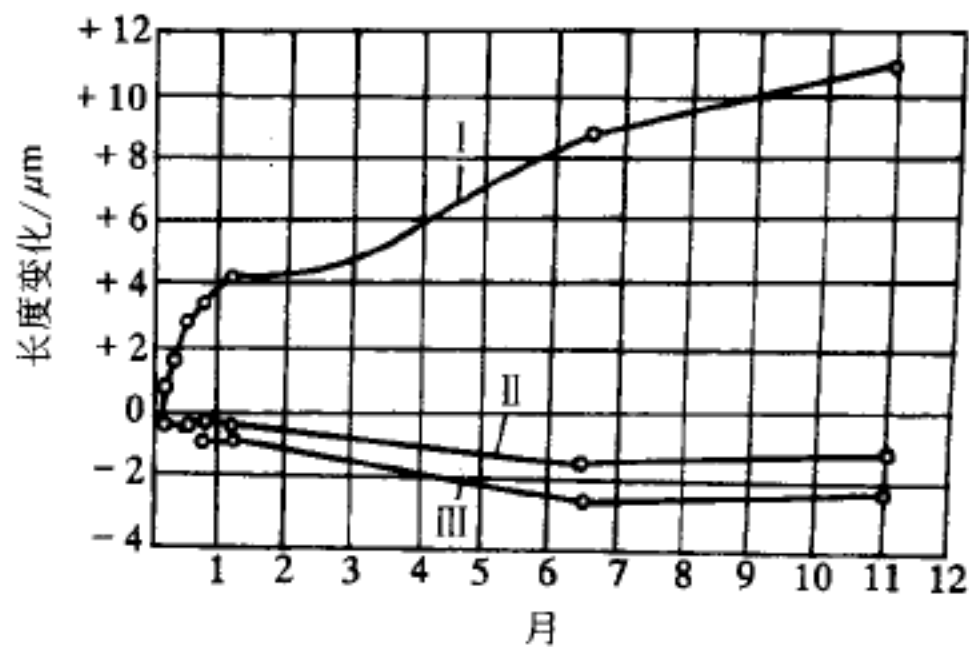


图 18-13 按各种热处理规范处理后的套圈尺寸变化
I—在 50~60℃ 油中淬火,150℃ 回火 2h
II—在 50~60℃ 油中淬火,-70℃ 深冷处理,150℃ 回火 2h
III—在 50~60℃ 油中淬火,流动冷水冷却,150℃ 回火 2h

5) 回火(表 18-19 和表 18-20,图 18-14 和图 18-15)

表 18-19 轴承零件回火规范

零件名称	轴承零件精度等级	回火温度和时间	备注
中小型滚柱	0 级、I 级、II 级、III 级	150~180℃,2.5~3.5h	滚子直径 ≤ 28mm
大型滚柱	一般品	150~180℃,3~6h	28mm < 滚子直径 ≤ 50mm
	一般品	150~180℃,6~12h	滚子直径 > 50mm
钢 球	一般品	150~180℃,3~3.5h	钢球直径 < 48.76mm
	5、10、16 级	150~180℃,3~4h	
中小型套圈	一般品	150~180℃,2.5~4h	—
	C 级、B 级	160~200℃,3.0~4h	
大型轴承套圈 (GCr15SiMn 钢)	一般品	150~180℃,3.5~4h	—
特大型轴承套圈	一般品	150~180℃,6~12h	
关节轴承套圈	一般品	200~250℃,2~3h	
有枢轴的长圆滚柱	一般品	320~330℃,2~3h	

表 18-20 轴承零件高温回火规范

套 圈	回 火 温 度 /℃		保温时间 /h	回火介质
	滚 子	钢 球		
220	同一般回火工艺	同一般回火工艺	3	过热气缸油
225	同一般回火工艺	同一般回火工艺	3	HG—38、HG—52、
250	直径 < 15mm 时为 170~180	直径 < 25.4mm 时为 150~160	3	HG—62 或 HG—72H
	直径 ≥ 15mm 时为 250~300	直径 ≥ 25.4mm 时为 250~300	3	HG—65H、HG—33H
350	350	350	3	空气
400	400	400	3	
450	450	450	3	

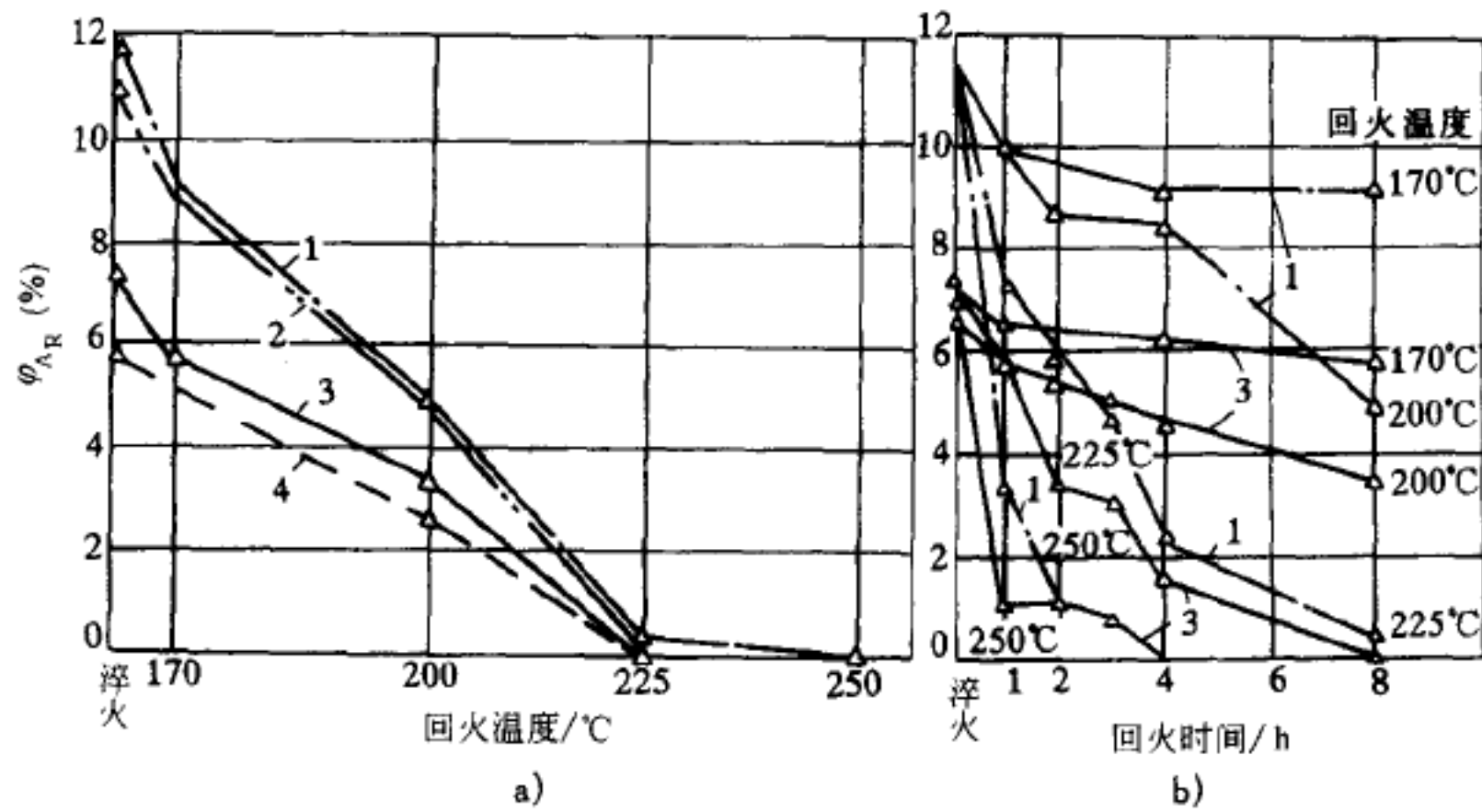


图 18-14 回火温度、回火时间对 GCr15 钢(850℃淬火)残留奥氏体的影响

a)回火温度的影响(保温 8h) b)回火时间的影响

1—未经深冷处理(15℃) 2—深冷处理(-25℃, 1h) 3—深冷处理(-78℃, 1h) 4—深冷处理(-196℃, 1h)

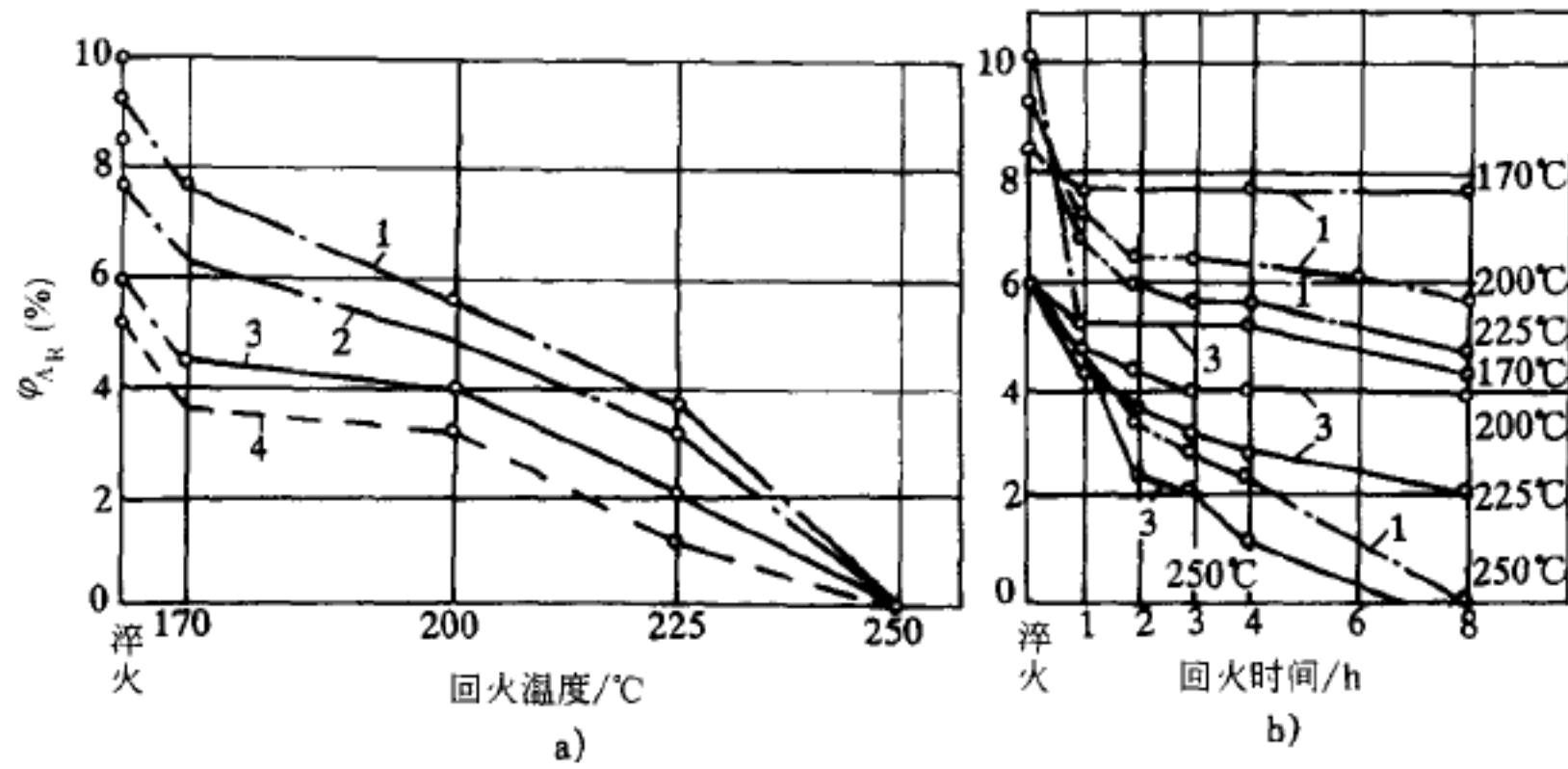


图 18-15 回火温度、回火时间对 GCr15SiMn 钢残留奥氏体的影响

a)回火温度的影响(保温 8h) b)回火时间的影响

1—未经深冷处理(15℃) 2—深冷处理(-25℃, 1h) 3—深冷处理(-78℃, 1h) 4—深冷处理(-196℃, 1h)

6) 稳定化(表 18-21)

表 18-21 稳定化处理工艺

名 称	轴承零件精度等级	稳定化处理温度与时间
中小型滚子	0 级、I 级	120 ~ 160℃, 12h
	II 级	120 ~ 160℃, 3 ~ 4h
钢球	5 级, 10 级, 16 级	120 ~ 160℃, 12h
大型钢球	20 级, 一般品	120 ~ 160℃, 3 ~ 5h
中小型套圈	C 级	粗磨后: 140 ~ 180℃, 4 ~ 12h
	B 级	细磨后: 120 ~ 160℃, 3 ~ 24h
	D、E 级	120 ~ 160℃, 3 ~ 5h
	短圆柱滚子	120 ~ 160℃, 3 ~ 5h
	F、G 级	120 ~ 160℃, 3 ~ 4h
大型、特大型套圈	D、E、F、G 级	120 ~ 160℃, 3 ~ 4h

(2) 热处理后质量要求(表 18-22 ~ 表 18-28)

表 18-22 轴承零件回火后的硬度要求

钢 号	轴承零件名称 ^①	轴承成品硬度值 HRC
GCr15	套圈	61 ~ 65
	钢球(直径 < 45mm)	62 ~ 66
	钢球(直径 > 45mm)	60 ~ 66
	圆锥滚柱、球面滚柱、短圆柱滚柱	61 ~ 65
	关节轴承套圈	58 ~ 64
	滚针(长度/直径 > 2.5, 直径 < 6mm)	61 ~ 65
	长圆柱滚柱(长度/直径 > 2.5, 直径 > 6mm)	61 ~ 65
	有枢轴的长圆滚柱	48 ~ 56 ^②
GCr15SiMn	套圈	60 ~ 64
	钢球	60 ~ 66
	滚柱	61 ~ 65

① 同一零件不同部位硬度差不得超过 2HRC。

② 回火温度选用 320 ~ 330℃。

表 18-23 高温回火的轴承零件硬度要求

回火温度 /℃	代 号	硬 度 要 求 HRC		
		套 圈	钢 球	滚 子
200	T	60 ~ 63	62 ~ 66	61 ~ 65
225	T ₁	59 ~ 62	62 ~ 66	61 ~ 65
250	T ₂	58 ~ 62	58 ~ 62	58 ~ 62
300	T ₃	55 ~ 59	56 ~ 59	55 ~ 59

表 18-24 轴承零件淬、回火后对脱碳层的要求

套圈外径 /mm		脱碳层深度 /mm	滚 动 体				
			钢 球			滚 柱	
>	≤	≤	直 径 /mm	直 径 /in	脱碳层深度 /mm	直 径 /mm	脱碳层深度 /mm
	30	0.05	≤ 12.7	≤ 1/2	0.06	≤ 20	0.08
30	80	0.06	12.700 ~ 19.050	1/2 ~ 3/4	0.08	20 ~ 30	0.10
80	120	0.08	19.050 ~ 30.163	3/4 ~ 1 ³ / ₁₆	0.10	30 ~ 50	0.12
120	180	0.10	30.163 ~ 42.863	1 ³ / ₁₆ ~ 1 ¹¹ / ₁₆	0.12	50 ~ 80	0.14
180	250	0.12	42.863 ~ 76.200	1 ¹¹ / ₁₆ ~ 3	0.14		
250		0.20					

表 18-25 轴承套圈淬、回火后允许的圆度

设计外径/mm		轻中重系列套圈				特、轻、超轻系列 套圈允许圆度 /mm	特轻窄、超轻窄、特窄 系列套圈允许圆度 /mm≤
>	≤	外径设计留量 /mm	允许的圆度 /mm	外径允许留量/mm			
				≥	≤		
30	50	0.25 ^{+0.15}	0.15	0.15	0.40	0.18	0.20
50	80	0.30 ^{+0.15}	0.18	0.15	0.50	0.25	0.30
80	120	0.30 ^{+0.20}	0.20	0.20	0.55	0.25	0.30
120	150	0.35 ^{+0.20}	0.25	0.20	0.60	0.30	0.35
150	180	0.45 ^{+0.20}	0.30	0.25	0.70	0.35	0.40
180	250	0.5 ^{+0.20}	0.35	0.30	1.05	0.40	0.50
250	315	0.65 ^{+0.25}	0.45	0.40	1.25	0.55	0.65
315	400	0.80 ^{+0.30}	0.50	0.45	1.55	0.60	0.70
400	500	1.00 ^{+0.40}	0.70	0.60	1.80	0.70	0.85
500	630	1.20 ^{+0.40}	0.80	0.70	2.20	0.85	1.00

设计内径/mm		轻中重系列套圈				特轻、超轻系列 套圈允许圆度 /mm≤	特轻窄、超轻窄、特窄 系列套圈允许圆度 /mm≤
>	≤	内径设计留量 /mm	允许的圆度 /mm	内径允许留量			
				≥	≤		
	30	0.15 ^{+0.10}	0.10	0.10	0.35	0.12	0.15
30	50	0.20 ^{+0.10}	0.15	0.15	0.45	0.18	0.20
50	80	0.25 ^{+0.15}	0.18	0.15	0.60	0.20	0.25
80	120	0.30 ^{+0.20}	0.20	0.18	0.70	0.25	0.30
120	180	0.40 ^{+0.25}	0.30	0.25	0.90	0.35	0.40
180	250	0.50 ^{+0.25}	0.35	0.30	1.25	0.40	0.50
250	315	0.65 ^{+0.30}	0.40	0.40	1.50	0.50	0.55
315	400	0.80 ^{+0.30}	0.50	0.50	1.80	0.60	0.70
400	500	1.00 ^{+0.35}	0.60	0.70	2.20	0.70	0.85

表 18-26 一般轴承套圈淬、回火允许的挠曲度

设计内径/mm		中、轻系列轴承		特轻、超轻系列套圈		特轻窄、超轻窄、特窄系列套圈	
>	≤	高度设计留量 /mm	允许挠曲度 /mm	高度设计留量 /mm	允许挠曲度 /mm	高度设计留量 /mm	允许挠曲度 /mm
30	50	0.25 ^{+0.10}	0.20	0.30 ^{+0.10}	0.25	0.40 ^{+0.10}	0.35
50	80	0.30 ^{+0.12}	0.25	0.35 ^{+0.12}	0.30	0.45 ^{+0.12}	0.40
80	120	0.35 ^{+0.15}	0.30	0.40 ^{+0.15}	0.35	0.50 ^{+0.15}	0.45
120	180	0.40 ^{+0.15}	0.35	0.50 ^{+0.15}	0.45	0.60 ^{+0.15}	0.50
180	250	0.45 ^{+0.18}	0.40	0.55 ^{+0.18}	0.48	0.65 ^{+0.18}	0.55
250	315	0.50 ^{+0.20}	0.45	0.60 ^{+0.20}	0.52	0.75 ^{+0.20}	0.65
315	400	0.60 ^{+0.25}	0.52	0.70 ^{+0.25}	0.60	0.85 ^{+0.25}	0.75
400	500	0.70 ^{+0.25}	0.60	0.80 ^{+0.25}	0.70	0.95 ^{+0.25}	0.80

表 18-27 推力轴承套圈和隔圈淬、回火后允许的畸变量

设计外径 /mm		允许椭圆度 /mm	轻、中、重系列		超轻、特轻系列		隔圈		
			高度设计留量 /mm	允许挠曲度 /mm	高度设计留量 /mm	允许挠曲度 /mm	高度设计留量 /mm	允许挠曲度 /mm	允许椭圆度 /mm
>	≤								
30	50	0.15	0.30 ^{+0.10}	0.15	0.35 ^{+0.10}	0.20	—	—	—
50	80	0.25	0.35 ^{+0.10}	0.25	0.40 ^{+0.10}	0.35	—	—	—

(续)

设计外径 /mm		允许椭圆度 /mm	轻、中、重系列		超轻、特轻系列		隔圈		
			高度设计留量 /mm	允许挠曲度 /mm	高度设计留量 /mm	允许挠曲度 /mm	高度设计留量 /mm	允许挠曲度 /mm	允许椭圆度 /mm
>	≤								
80	120	0.25	0.40 ^{+0.12}	0.30	0.45 ^{+0.12}	0.35	0.50 ^{+0.15}	0.45	1.0
120	180	0.30	0.45 ^{+0.12}	0.40	0.50 ^{+0.12}	0.45	0.60 ^{+0.15}	0.55	1.0
180	250	0.35	0.50 ^{+0.15}	0.45	0.60 ^{+0.15}	0.55	0.80 ^{+0.20}	0.70	1.0
250	315	0.40	0.60 ^{+0.18}	0.55	0.80 ^{+0.18}	0.70	0.90 ^{+0.20}	0.80	1.2
315	400	0.45	0.70 ^{+0.20}	0.65	0.90 ^{+0.20}	0.75	1.00 ^{+0.25}	0.90	1.2
400	500	0.55	0.80 ^{+0.20}	0.70	1.00 ^{+0.20}	0.85	1.20 ^{+0.25}	1.10	1.2
500	630	0.60	0.90 ^{+0.25}	0.80	1.15 ^{+0.25}	0.95	1.40 ^{+0.30}	1.20	1.5

表 18-28 钢球的压碎载荷

钢 球 直 径		破 碎 载 荷/kN		钢 球 直 径		破 碎 载 荷/kN	
/in	/mm	热处理不低于	成品不低于	/in	/mm	热处理不低于	成品不低于
1/8	3.176	3.9	5.1	23/32	18.256	124.0	155.0
5/32	3.969	6.2	7.9	3/4	19.50	135.0	169.0
3/16	4.763	8.9	11.4	25/32	19.884	147.0	183.0
7/32	5.556	12	15.3	13/16	20.638	159.0	197.0
15/64	5.953	13.9	17.0	7/8	22.225	184.0	227.0
1/4	6.350	15.8	20.0	29/32	23.019	197.0	237.0
9/32	7.144	20.0	25.4	15/16	23.812	211.0	259.0
5/16	7.938	24.7	30.9	1	25.400	240.0	293.0
11/32	8.731	29.9	37.3	1 ¹ / ₁₆	26.988	271.0	329.0
3/8	9.525	35.6	44.2	1 ¹ / ₈	28.575	288.0	357.0
13/32	10.319	41.7	51.5	1 ³ / ₁₆	30.162	321.0	397.0
7/16	11.113	48.4	59.5	1 ¹ / ₄	31.750	356.0	438.0
29/64	11.509	51.9	64.5	1 ⁵ / ₁₆	33.338	392.0	481.0
15/32	11.906	55.6	69.1	1 ³ / ₈	34.925	430.0	524.0
31/64	12.303	59.3	73.7	1 ⁵ / ₈	36.512	470.0	569.0
1/2	12.700	63.2	78.2	1 ¹ / ₂	38.100	512.0	617.0
17/32	13.494	67.8	86.5	1 ⁵ / ₄	41.275	601.0	719.0
9/16	14.288	76.0	96.4	1 ¹¹ / ₁₆	42.862	648.0	767.0
19/32	15.081	84.7	107.0	1 ³ / ₄	44.450	697.0	820.0
5/8	15.875	93.9	118.0	1 ⁷ / ₈	47.625	800.0	935.0
21/32	16.669	103.0	130.0	2	50.800	910.0	1050.0
11/16	17.462	114.0	142.0				

(3) 力学性能(表 18-29,表 18-30,图 18-16 ~ 图 18-27)

表 18-29 铬轴承钢热处理后的力学性能

钢 号	试样 毛坯直径 /mm	热处理制度	σ_b	σ_s	δ_5	ψ	a_{KU} /J ·cm ⁻²	HBW	σ_{bb}	f
			/MPa		(%)		/MPa		/mm	
GCr9	19	退火	616		24.8			190		
	19	退火	716	412	21	46	4.5	170		
	19	830℃ 淬火,160℃ 回火 2h					6.3	61 ~ 65HRC		

(续)

钢 号	试样 毛坯直径 /mm	热处理制度	σ_b	σ_s	δ_5	ψ	α_{KU} /J ·cm ⁻²	HBW	σ_{bb}	f
			/MPa		(%)		/MPa		/mm	
GCr9SiMn	19	退火 900℃正火,保温 15min 815 ~ 835℃油淬,150 ~ 160℃回火	702 1189		17.2	53.6	82.8 144.1	197 ~ 204 41 ~ 42HRC ≥62HRC		
GCr15	19	770 ~ 780℃退火 900℃正火 830 ~ 845℃油淬, 150 ~ 160℃回火 2 ~ 2.5h	588 ~ 716 1210 ~ 1224	353 ~ 412	15 ~ 25	25 ~ 59	45 ~ 90 78 5.5 ~ 8.6	179 ~ 207 39HRC 61 ~ 65HRC		
GCr15SiMn	19	退火 830℃淬火,500℃回火 2h 830℃淬火,180℃回火 1.5h	721 1427		12.7	57 21.7		170 ~ 207 39HRC 62HRC	2780	
G8Cr15	19	790℃退火 正火 830 ~ 850℃油淬,150 ~ 160℃回火	633 863	515	30.2 18.0	69.3 59.0	30	197 ~ 207 249 61 ~ 64HRC		

表 18-30 回火温度对铬轴承钢接触疲劳寿命的影响

钢 号	在下列回火温度下的接触疲劳寿命/h							试验条件
	150℃	180℃	200℃	250℃	300℃	350℃	400℃	
GCr15	230	—	205	—	115	—	—	A
GCr15	290	—	—	200	—	—	—	B
GCr15SiMn	400	490	—	250	—	—	—	C
GCr15	15.1	—	13.6	8.6	6.3	3.6	1.3	D
GCr15SiMn	18.2	—	14.1	9.6	6.6	2.3	1.6	E

注:A—在对滚式疲劳试验机上,使 $\phi 14.8\text{mm}$ 的球,在两个 $\phi 150\text{mm}$ 的圆柱之间滚动,载荷 $p = 1.47\text{kN}$,转速 $n = 1750\text{r/min}$ 。
B—用 $\phi 15\text{mm}$ 的球,其他同 A。
C—在对滚式疲劳试验机上试验, $\phi 15\text{mm}$ 钢球在两个 $\phi 250\text{mm}$ 圆柱体之间滚动,载荷 $p = 2.45\text{kN}$,转速 $n = 1100\text{r/min}$ 。
D—在对滚式疲劳试验机上试验, $\phi 6\text{mm}$ 圆柱形试样,在两个 $\phi 150\text{mm}$ 圆柱体之间滚动,载荷 $p = 1.04\text{kN}$,转速 $n = 6280\text{r/min}$ 。
E—试验条件同 D。

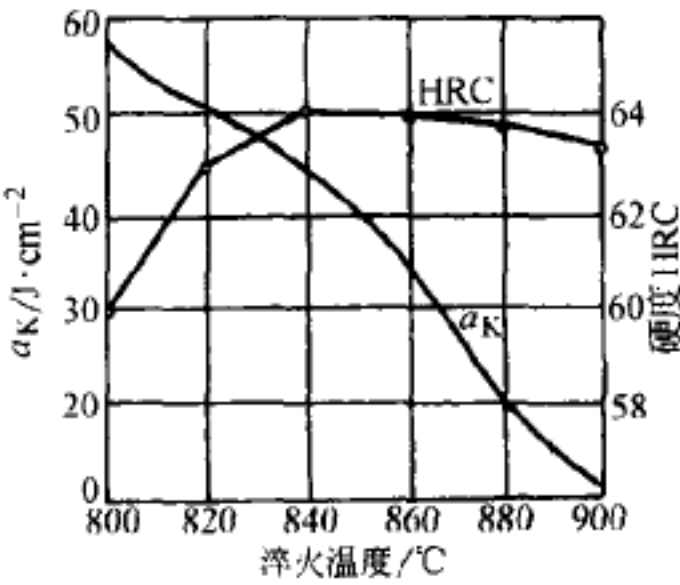


图 18-16 GCr9 钢硬度和冲击韧度与淬火温度的关系(用钢成分,质量分数,%:C1.09,Si0.29,Mn0.35,Cr1.21,S0.011,P0.012)

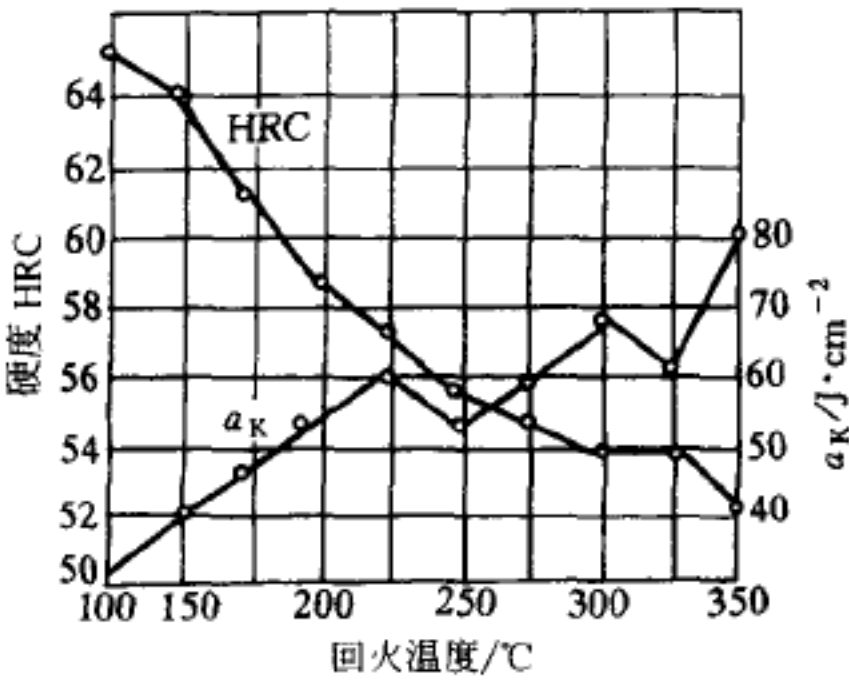


图 18-17 GCr9 钢硬度和冲击韧度与回火温度的关系(用钢成分与图 18-16 相同)

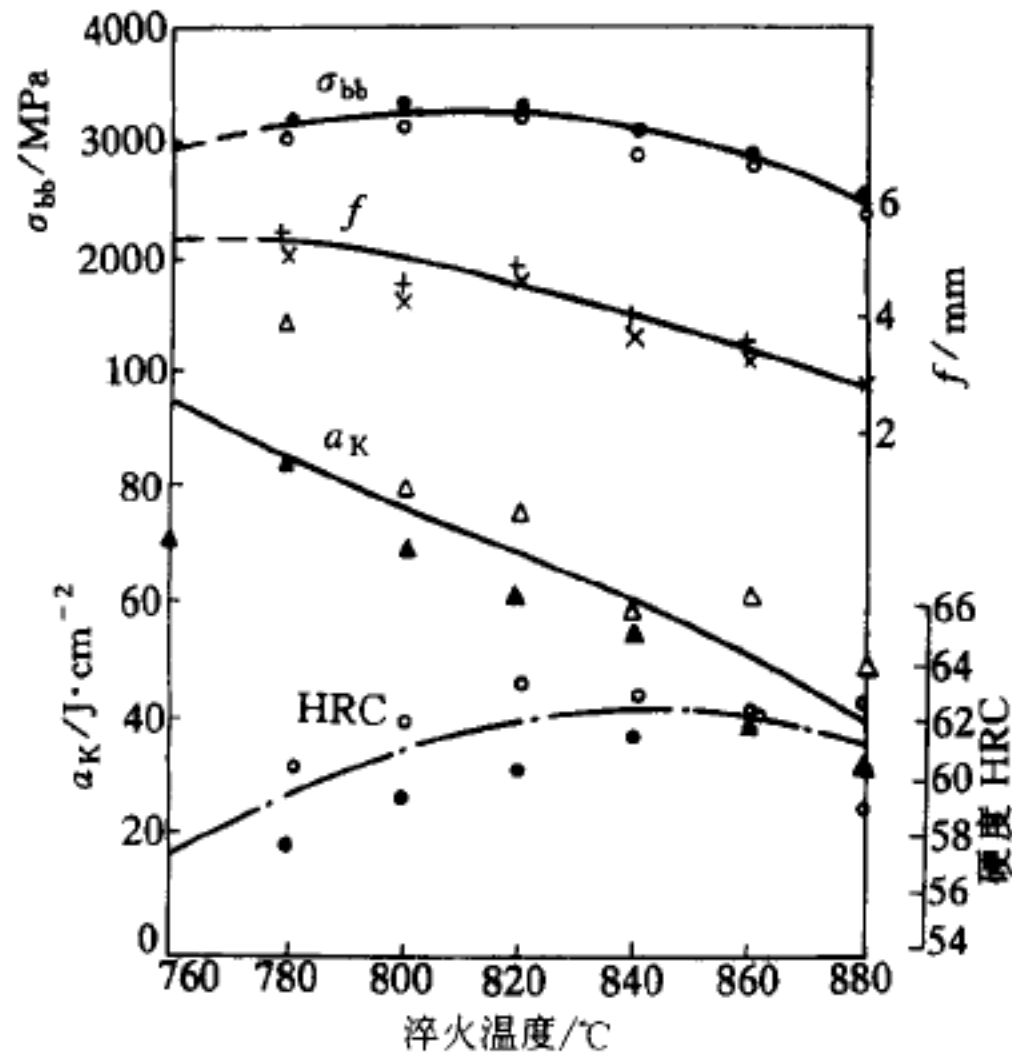


图 18-18 淬火温度对 GCr15 钢力学性能的影响
(淬火后经 160℃ 2h 回火; 抗弯试样尺寸:
10mm × 10mm × 110mm, $l_0 = 80$ mm)

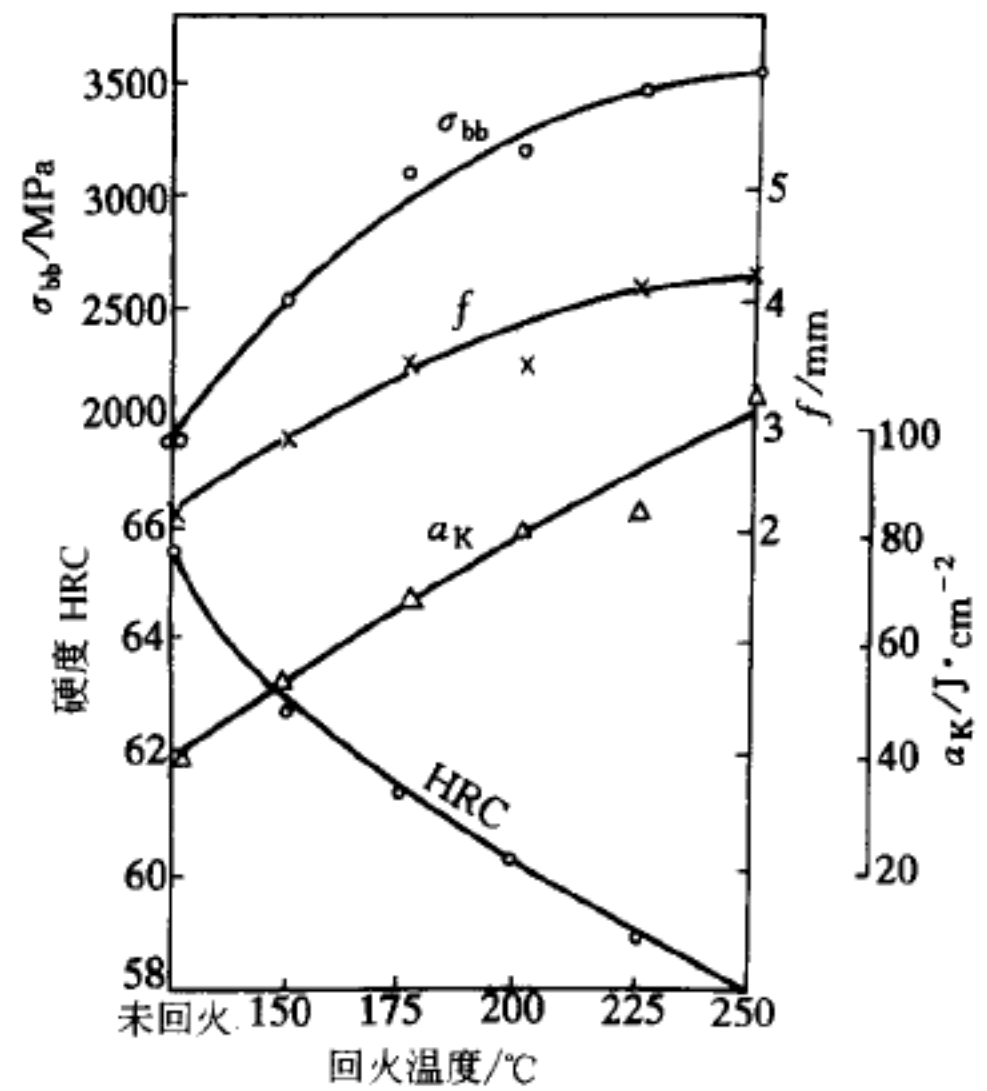


图 18-19 回火温度对 GCr15 钢力学性能的影响
(830℃ 淬火; 抗弯试样尺寸
与图 18-18 相同)

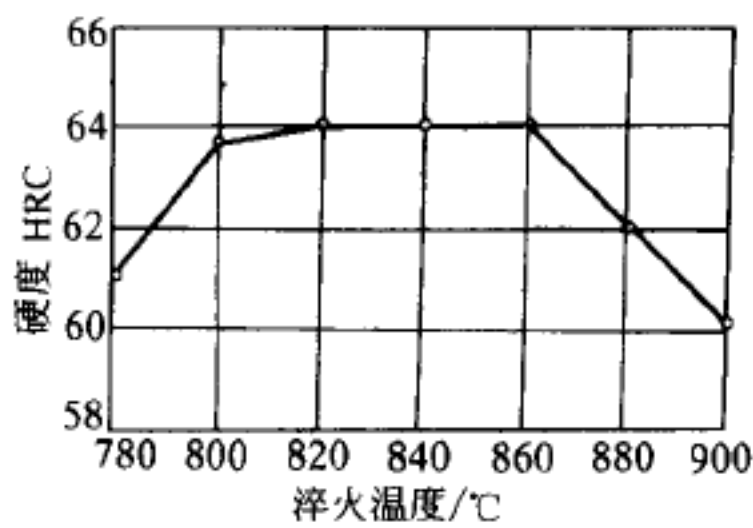


图 18-20 GCr15SiMn 钢硬度与淬火温度的关系
(用钢成分, 质量分数, %: C1.01, Si0.52,
Mn1.12, Cr1.38, S0.004, P0.012)

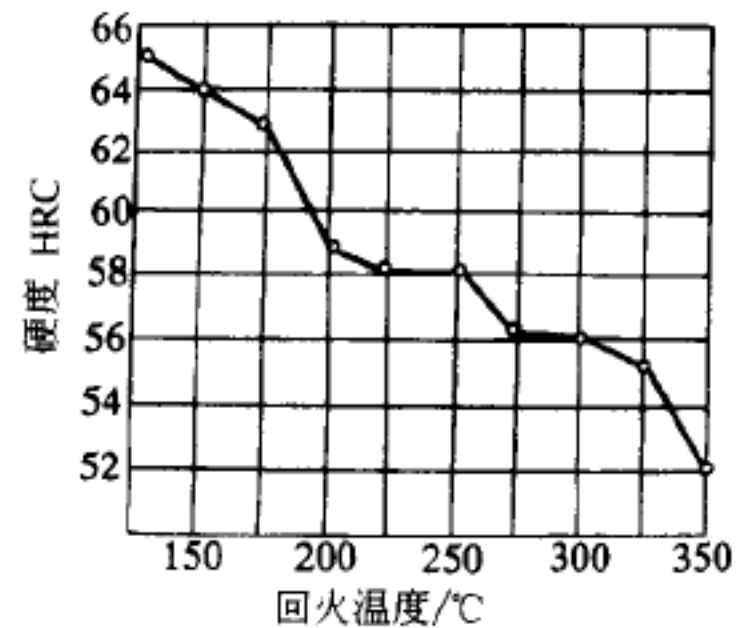
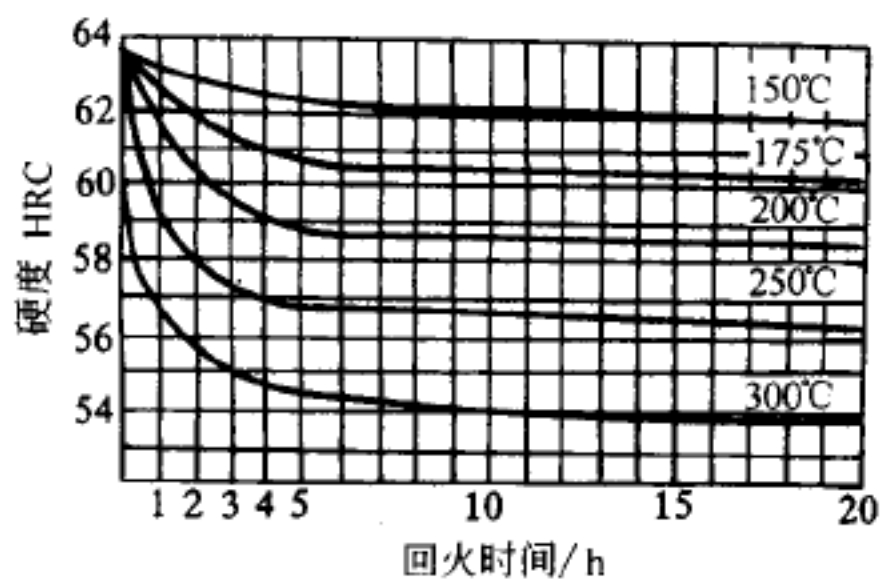
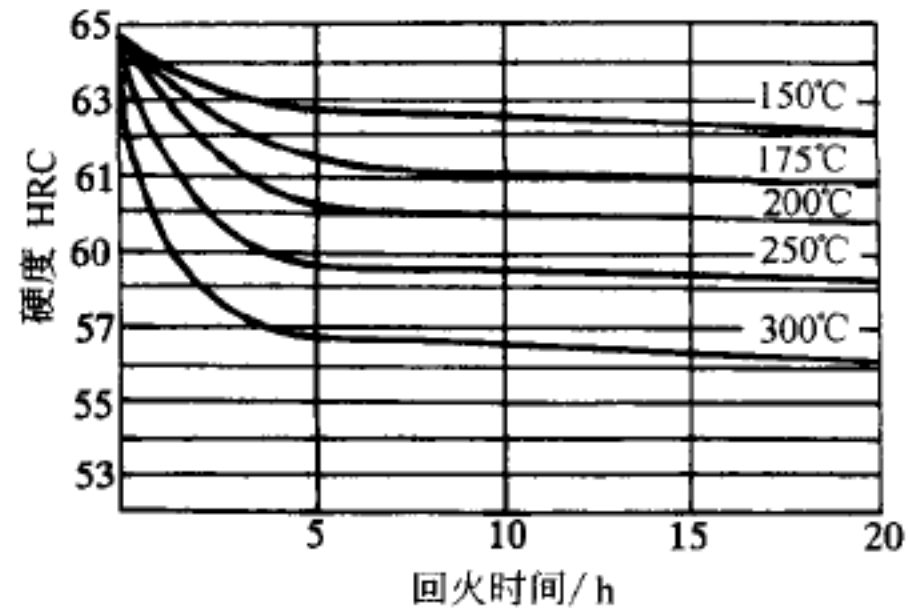


图 18-21 GCr15SiMn 钢硬度与回火温度的关系
(用钢成分与图 18-20 相同)



a)



b)

图 18-22 回火温度、回火时间对 GCr15 和 GCr15SiMn 钢硬度的影响
a) GCr15 钢 b) GCr15SiMn 钢

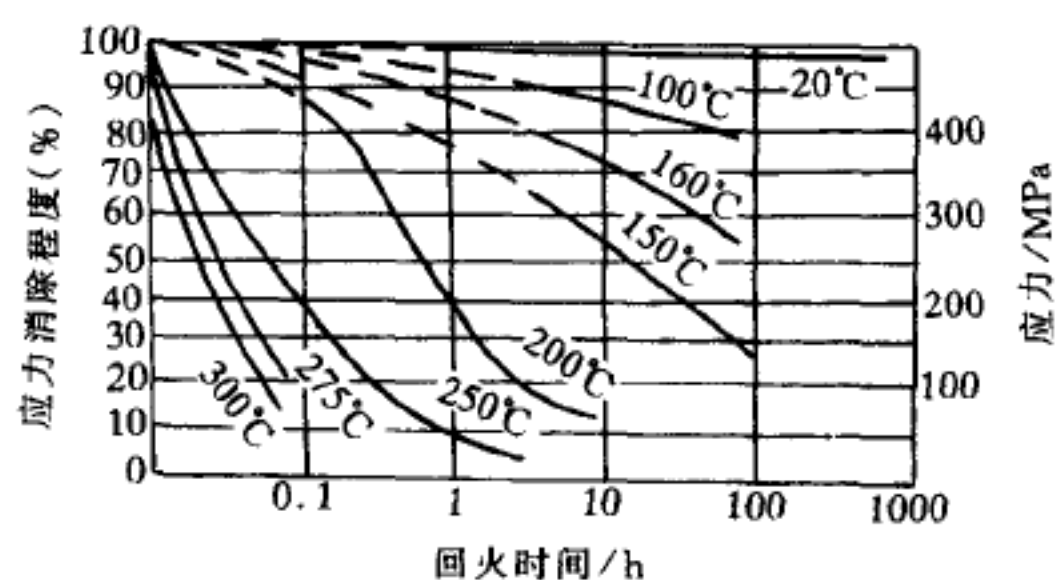


图 18-23 回火温度、回火时间对 GCr15 钢应力消除程度的影响

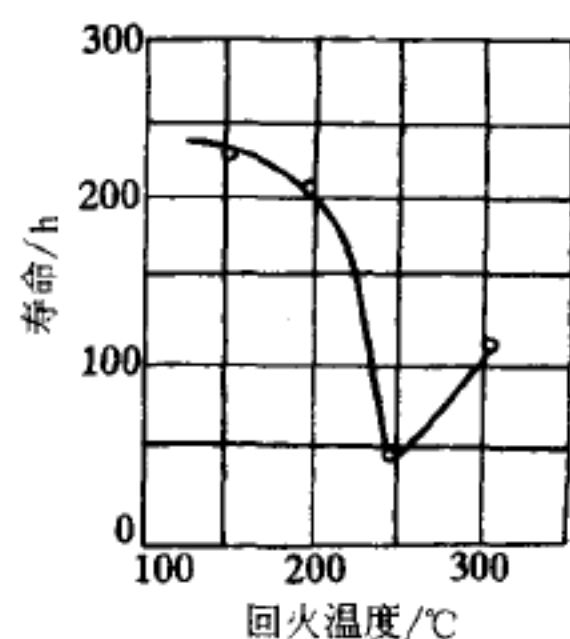


图 18-24 回火温度对 GCr15 钢接触疲劳寿命的影响

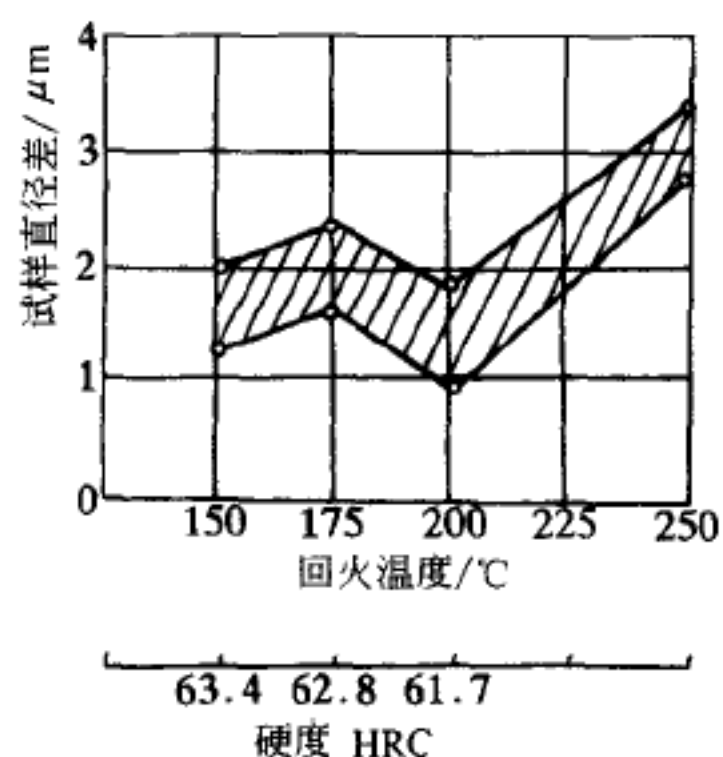


图 18-25 回火温度对 GCr15 钢耐磨性的影响(840°C 加热, 150°C 马氏体分级淬火, -78°C × 2h 深冷处理, 不同温度回火 3h)

注: 试样直径差指试样原始直径和经磨损试验后试样直径之差

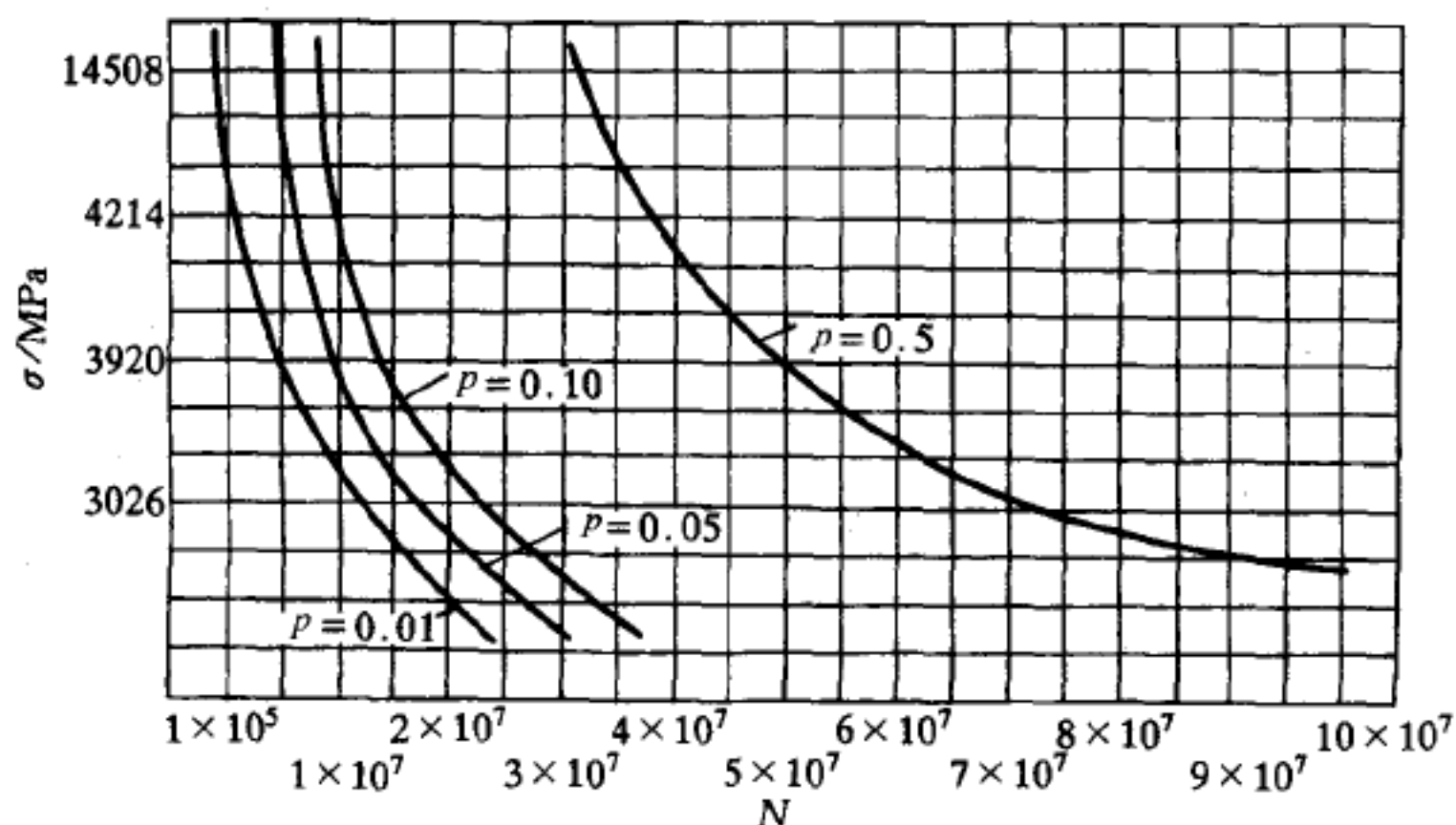


图 18-26 GCr15 钢接触疲劳 p - S - N 曲线

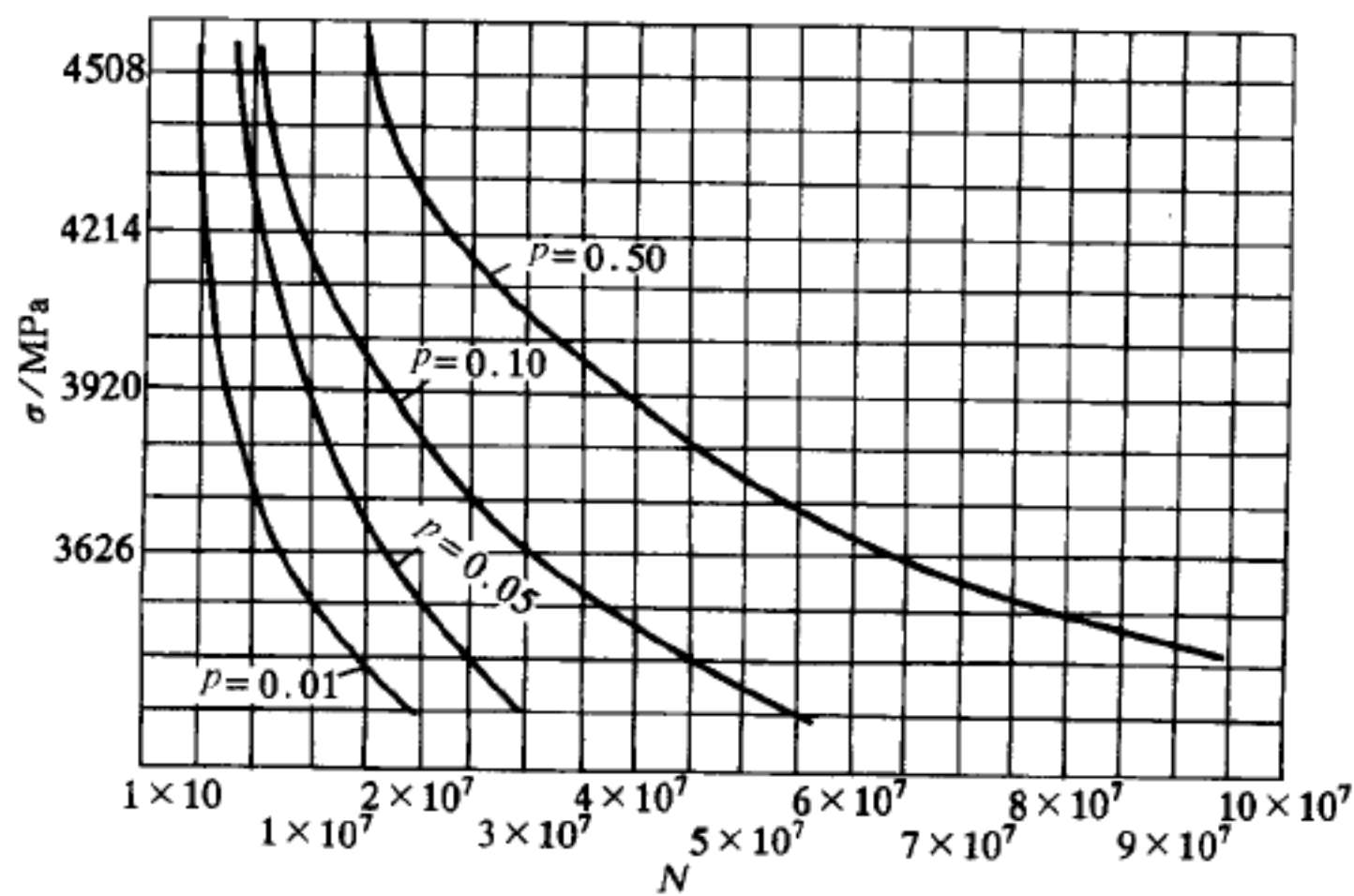


图 18-27 GCr15SiMn 钢接触疲劳 p - S - N 曲线

2. 无铬轴承钢热处理工艺和性能

(1) 热处理工艺(表 18-31 和表 18-32)

表 18-31 无铬轴承钢热处理工艺规范

钢 号	热加工温度/℃		普通退火			等 温 退 火			
	加 热	始 锻	温 度 /℃	冷却 方式	硬度 HBW	加热温度 /℃	等温温度 /℃	冷却 方式	硬度 HBW
		终 锻							
GSiMnV(RE)	1140 ~ 1180	1100 ~ 1170	770 ± 10	炉冷	≤ 217				
		≥ 850							
GSiMnMoV (RE)	1140 ~ 1180	1100 ~ 1170	760 ~ 800	炉冷	179 ~ 217				
		800 ~ 850							
GMnMoV (RE)	1170 ~ 1210	1120 ~ 1150	760 ~ 790	炉冷	≤ 217				
		900							
GSiMn(RE)	1120 ~ 1180	1050 ~ 1080	软化退火: 760℃ 4 ~ 5h, 以 20℃/h 冷至低于 650℃ 空冷 ≤ 217HBW			球化退火: 加热温度为 765℃ ± 15℃, 球化温度为 715℃ ± 10℃, 空冷 181 ~ 207HBW			
		≥ 800							

钢 号	正 火			淬 火			回 火					
	温度 /℃	冷却 方式	硬度 HBW	温度 /℃	冷却剂	硬度 HRC	各种不同温度回 火后的硬度值 HRC				常用回火 温度范围 /℃	硬度值 HRC
							150℃	200℃	300℃	400℃		
GSiMnV(RE)	900	空冷	≈ 32HRC	780 ~ 820	油	≥ 63	63	60	59	52	150 ~ 170	62 ~ 63
GSiMnMoV (RE)	900	空冷	≈ 35HRC	780 ~ 820	油	≥ 63	63	60	58	50	160 ~ 180	62 ~ 64
GMnMoV (RE)				780 ~ 810	油	≥ 63	63	60	56	50	150 ~ 170	62 ~ 63
GSiMn(RE)				790	油						150 ~ 170	61 ~ 64

(2) 力学性能(图 18-28 ~ 图 18-33)

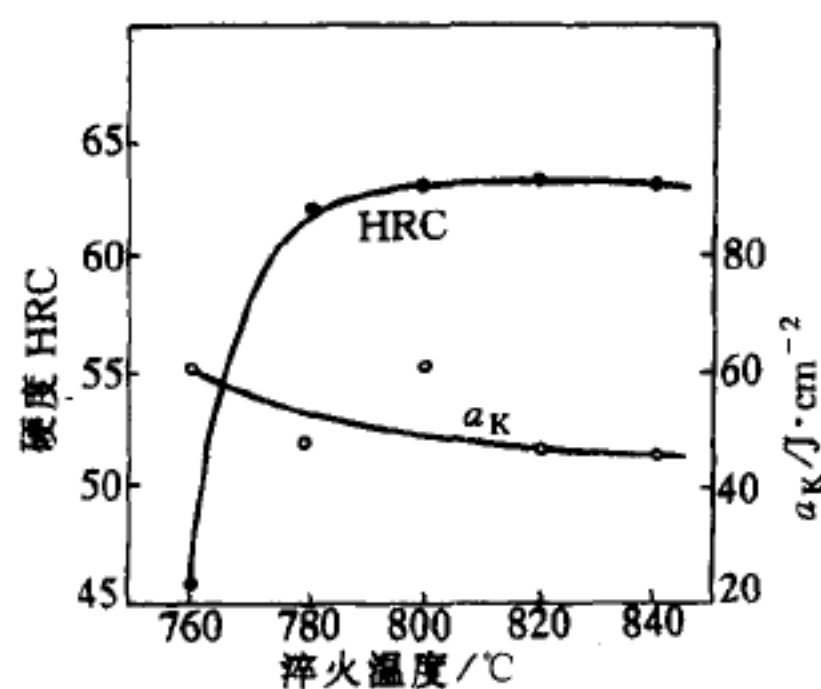


图 18-28 GSiMnMoV 钢力学性能与淬火温度的关系(160°C 回火 2h)

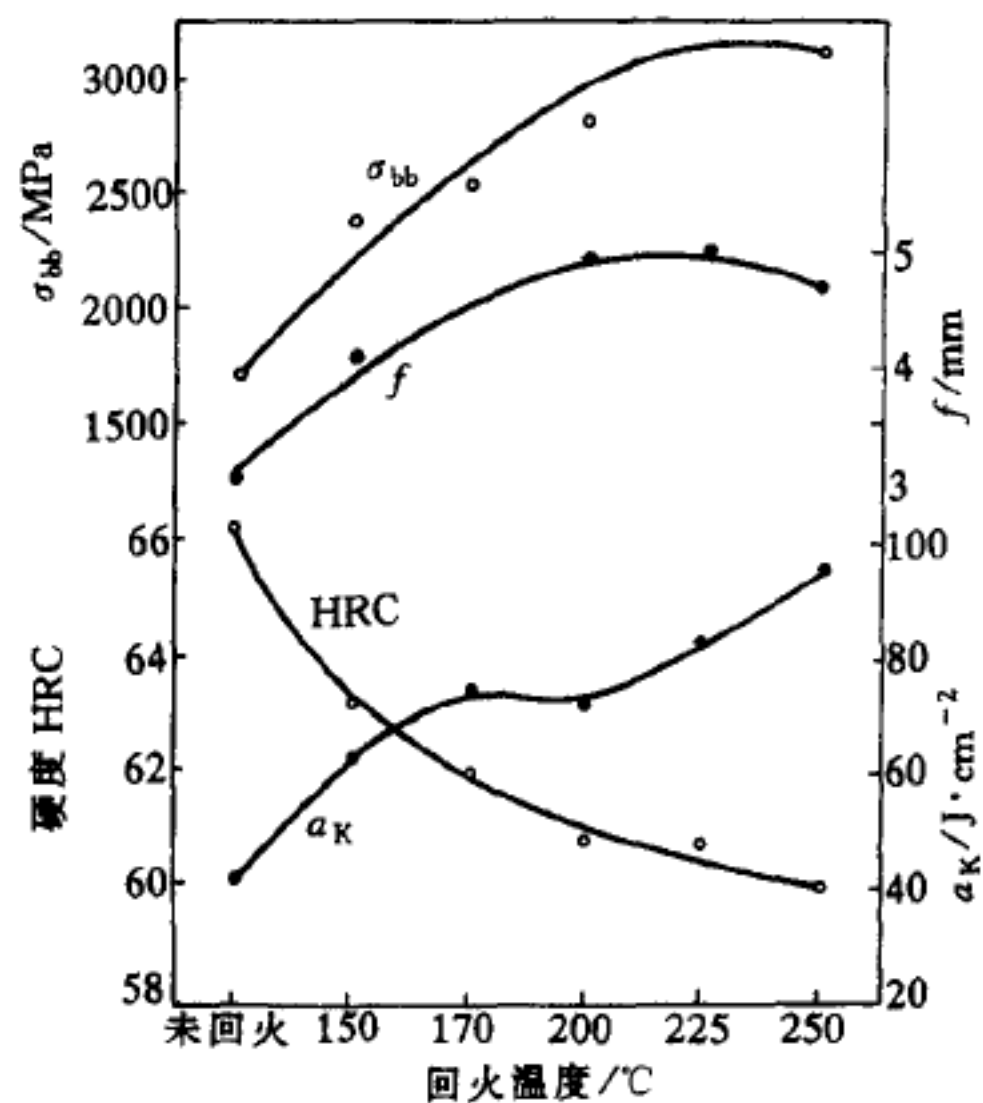


图 18-29 GSiMnMoV 钢力学性能与回火温度的关系(790°C 淬火)

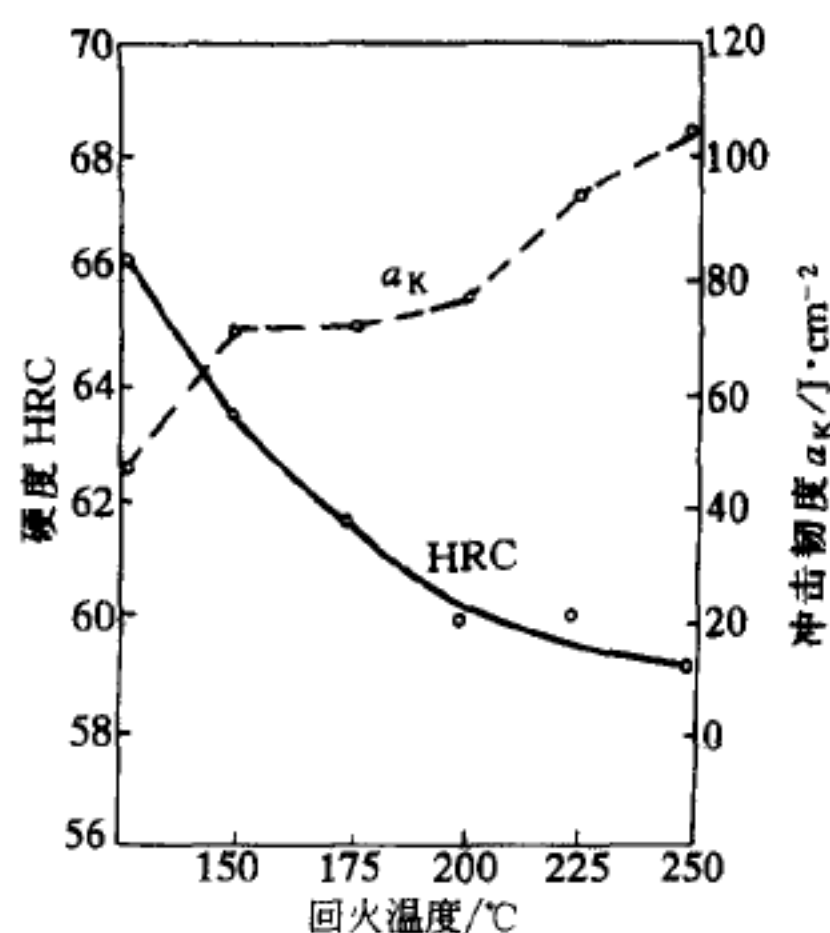


图 18-30 GMnMoV 钢力学性能与回火温度的关系(800°C 淬火)

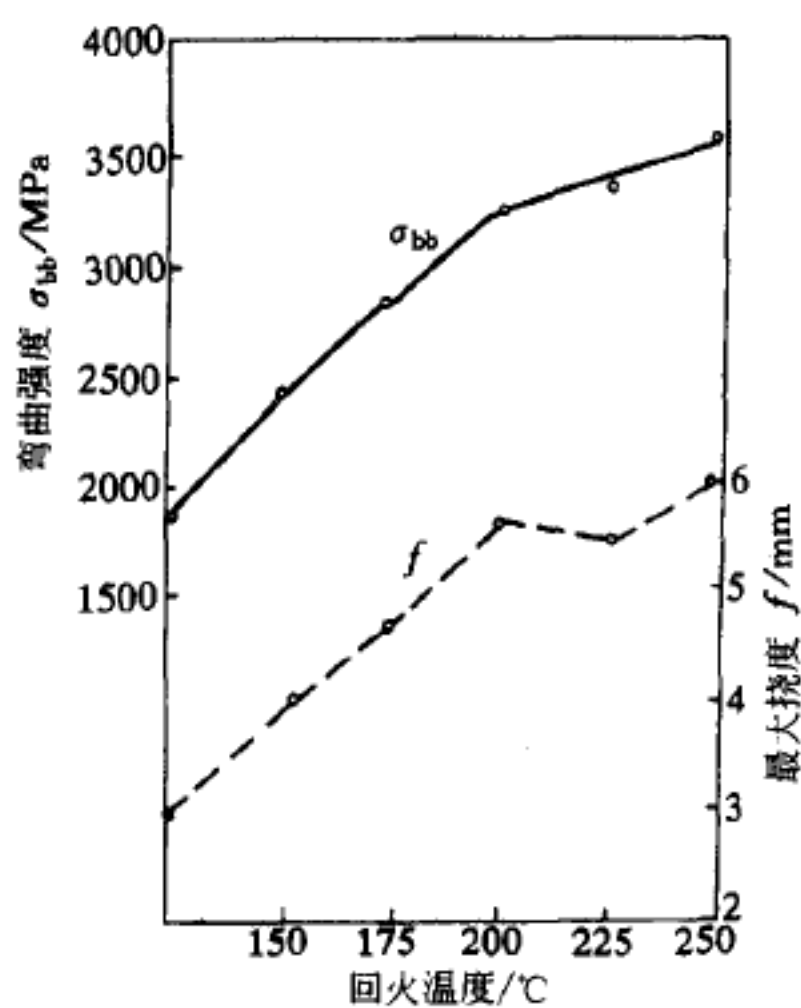


图 18-31 GMnMoV 钢抗弯强度、挠度与回火温度的关系

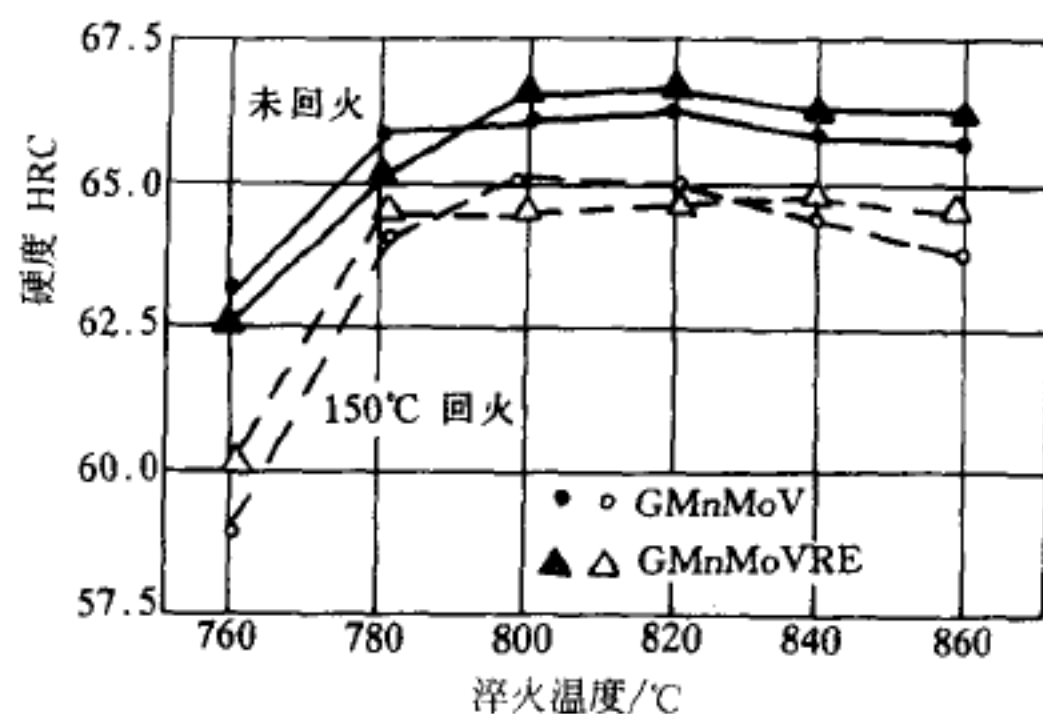
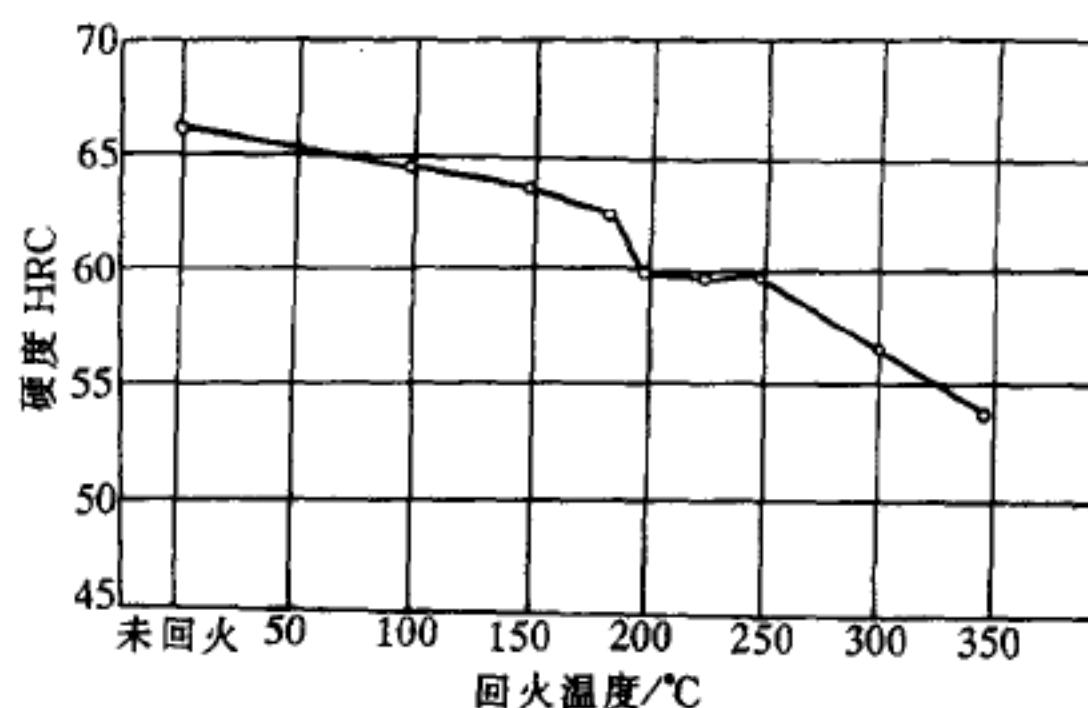


图 18-32 GMnMoV 钢的硬度与淬火温度的关系

图 18-33 GMnMoVRE 钢的硬度与回火温度的关系
(800℃ 淬火)

3. 渗碳轴承钢热处理工艺和性能

(1) 热处理工艺(表 18-33 ~ 表 18-36, 图 18-34)

表 18-33 渗碳轴承钢热处理工艺规范

钢 号	普通退火			正 火			高温回火		渗 碳 热 处 理						
	温度 /℃	冷却 方式	硬度 HBW	温度 /℃	冷却 方式	硬度 HBW	温度 /℃	硬度 HBW	渗碳 温度 /℃	一次淬 火温度 /℃	二次淬 火温度 /℃	直接淬 火温度 /℃	冷却 剂	回火 温度 /℃	硬度 HRC
G20CrMo	850 ~ 860	炉 冷	≤197	880 ~ 900	空 冷	167 ~ 215			920 ~ 940			840	油	160 ~ 180	表 ≥ 56 心 ≥ 30
G20CrNiMo	660	炉 冷	≤197	920 ~ 980	空 冷		670		930	880 ± 20	790 ± 20	820 ~ 840	油	150 ~ 180	表 ≥ 56 心 ≥ 30
G20CrNi2Mo				920 ± 20	空 冷				930	880 ± 20	800 ± 20		油	150 ~ 200	表 ≥ 56 心 ≥ 30
G10CrNi3Mo									930	880 ± 20	790 ± 20		油	150 ~ 200	表 ≥ 56 心 ≥ 30
G20Cr2Ni4	800 ~ 900	炉 冷	≤269	890 ~ 920	空 冷		640 ~ 670	≤269	930 ~ 950	870 ~ 890	790 ~ 810		油	160 ~ 180	表 ≥ 58 心 ≥ 28
G20Cr2Mn2Mo	600℃ 4 ~ 6h, 空冷至 280 ~ 300℃, 再加热至 640 ~ 660℃ 2 ~ 6h 空冷, ≤269HB			910 ~ 930	空 冷		640 ~ 660	≤269	920 ~ 950	870 ~ 890	810 ~ 830		油	160 ~ 180	表 ≥ 58 心 ≥ 30

表 18-34 中小型轴承零件渗碳层深度要求

套圈壁厚 /mm	渗碳层深度 /mm	滚子直径 /mm	渗碳层深度 /mm	钢球直径 /mm	渗碳层深度 /mm
6 ~ 7	1.3 ~ 1.6	7 ~ 10	1.4 ~ 1.6	≤4	0.38 ~ 0.65
8 ~ 10	1.8 ~ 2.2	11 ~ 14	1.7 ~ 1.9	5 ~ 8	0.8 ~ 1.3
11 ~ 14	2.3 ~ 2.7	15 ~ 19	2.0 ~ 2.2	9.2	1.4 ~ 1.7
15 ~ 19	2.8 ~ 3.2	—	—	13 ~ 18	1.8 ~ 2.0
20 ~ 25	3.3 ~ 3.7	20 ~ 25	2.3 ~ 2.5	19 ~ 25	2.1 ~ 2.3

表 18-35 特大型渗碳轴承零件渗碳层厚度的要求

内 外 套		滚 动 体(滚柱)	
轴承外径/mm	渗碳层厚度/mm	滚子直径/mm	渗碳层厚度/mm
≤700	≥4.2	≤50	≥3.5
700~1000	≥4.7	50~80	≥4.0
>1000	≥5.0	>80	≥4.5

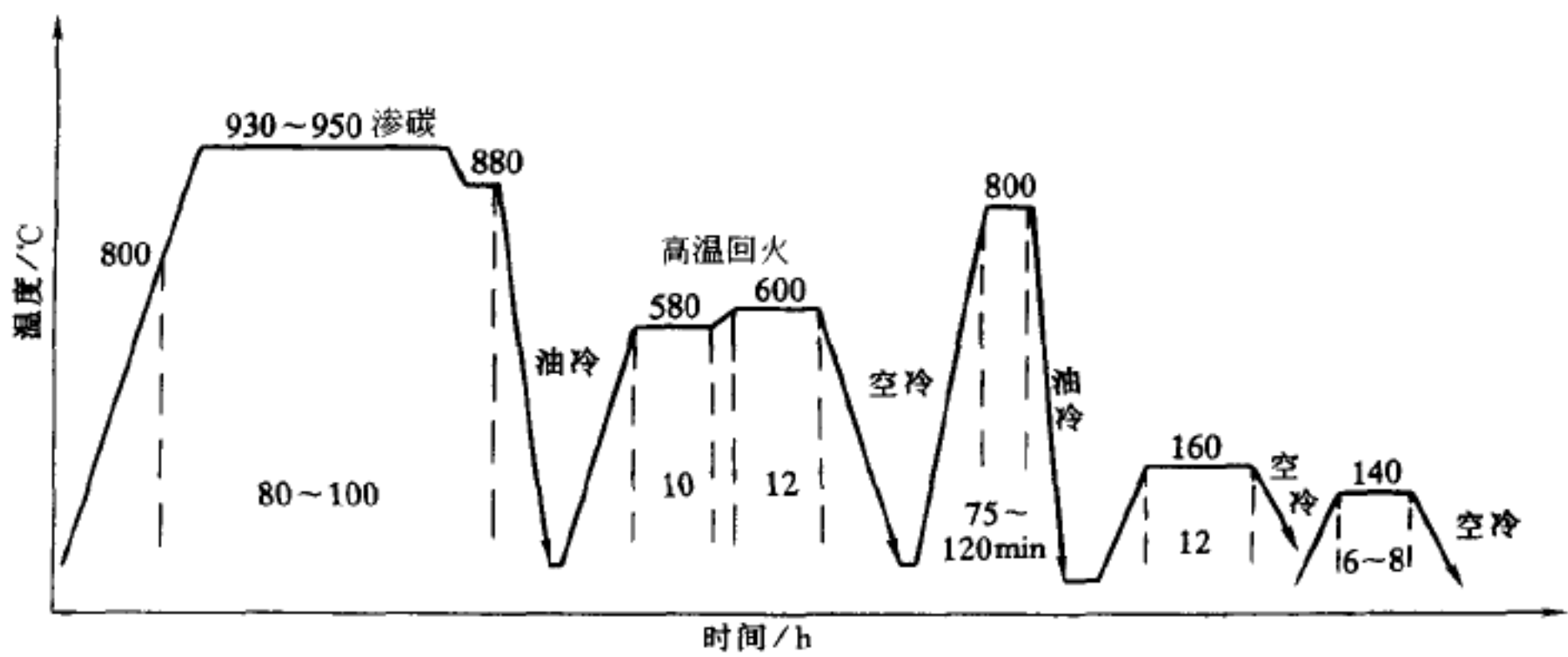


图 18-34 特大型轴承渗碳热处理工艺

表 18-36 特大型渗碳轴承零件圆度允许值

外 套		内 套		外 套		内 套	
外径/mm	允许圆度/mm	外径/mm	允许圆度/mm	外径/mm	允许圆度/mm	外径/mm	允许圆度/mm
400~450	0.7	<400	0.6	800~900	1.5	700~800	1.3
450~500	0.9	400~450	0.7	900~1000	1.6	800~900	1.6
500~600	1.0	450~500	0.9	1000~1100	1.8	900~1000	1.6
600~700	1.2	500~600	1.0	1100~1200	1.9	1000~1100	1.8
700~800	1.3	600~700	1.3	1200~1300	2.1	1100~1200	1.8

注:渗碳轴承零件在渗碳、淬火、回火过程中都会产生收缩。

(2) 力学性能(表 18-37)

表 18-37 渗碳轴承钢热处理后的力学性能

钢 号	试样 毛坯 直径 /mm	热处理制度	σ_b	σ_s	δ_5	ψ	a_{KU} /J·cm ⁻²	HBW	σ_{bb} /MPa	f /mm
			/MPa		(%)					
G20CrNi2Mo	25	880℃±20℃, 800℃±20℃油淬 150~200℃回火空冷	≥1000		≥13	≥45	≥78.5 (8)			
G10CrNi3Mo	15	880℃±20℃, 790℃±20℃油淬 180~200℃回火空冷	≥1100		≥9	≥45	≥78.5 (8)			

(续)

钢 号	试样 毛坯 直径 /mm	热处理制度	σ_b	σ_s	δ_5	ψ	a_{KU}	HBW	σ_{bb}	f
			/MPa		(%)		/J·cm ⁻²		/MPa	/mm
G20Cr2Ni4	15	870℃±20℃, 790℃±20℃油淬 150~200℃回火空冷	≥1200		≥10	≥45	≥78.5 (8)			
	15	940℃渗碳, 780℃油淬 150℃回火	表面硬度	62HRC	心部硬度	42.5HRC	渗碳层深	2.2mm	2666	3.08
	15	940℃渗碳, 800℃油淬 150℃回火	表面硬度	62HRC	心部硬度	43HRC	渗碳层深	2.3mm	2764	3.22
G20Cr2Mn2Mo	15	880℃±20℃, 810℃±20℃油淬 180~200℃回火空冷	≥1300		≥9	≥40	≥68.7 (7)			
	15	940℃ { 800℃油淬, 150℃回火	表面硬度	62HRC	心部硬度	41.5HRC	渗碳层深	2.3mm	2398	2.67
		渗碳 { 820℃油淬, 150℃回火	表面硬度	63HRC	心部硬度	42HRC	渗碳层深	2.3mm	2485	2.99
G20CrNiMo	15	880℃±20℃, 790℃±20℃油淬 150~200℃回火空冷	≥1200		≥9	≥45	≥78.5 (8)			

4. 不锈钢轴承钢热处理工艺和性能

(1) 热处理工艺(表 18-38 ~ 表 18-41, 图 18-35 ~ 图 18-38)

表 18-38 9Cr18、9Cr18Mo 钢轴承零件热处理工艺规范

工序名称	加热温度 /℃	保温时间 /h	冷 却	硬 度 HRC	金 相 组 织
去应力退火	600~650	4~6	空 冷		
低温退火	680~780	4~6	炉冷或空冷		
一般退火	850~870	3~6	≤90℃/h 冷却 550℃出炉	207~255HBW	细球化组织
等温退火	850~870	3~6	≤90℃/h 冷却到 730~750℃, 等温 2~4h 后炉冷到 550℃	207~255HBW	细球化组织
淬火	1060~1100		30~60℃油冷, 空冷, 或 150~170℃热油冷	>59	细马氏体和残留碳化物以 及残留奥氏体
冷处理	-70~-80	1~2	空 冷	>59	
回 火	150~160	3	空 冷	≥58~62	
	200	3	空 冷	≥55	
	250	3	空 冷	≥54	
	300	3	空 冷	≥53	
	400	3	空 冷	≥55	
附加回火	120~140	3~5	空 冷		

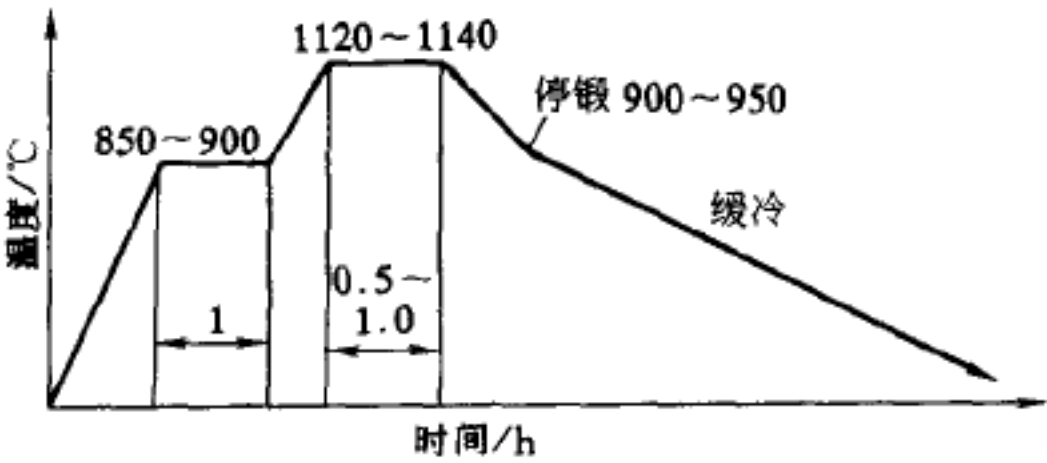


图 18-35 9Cr18 钢制套圈锻造加热冷却工艺

表 18-39 9Cr18 钢轴承零件淬火加热温度和保温时间

有效厚度 /mm	预 热		加 热		加热设备	备 注
	温 度 /℃	时 间 /min	温 度 /℃	时 间 /min		
< 3	800 ~ 850	6 ~ 10	1050 ~ 1070	3 ~ 6	箱式电阻炉	在盐浴炉中加热的保温时间可按 1min/mm, 厚度 > 14mm 者可按 40 ~ 70s/mm
3 ~ 5	800 ~ 850	10 ~ 15	1050 ~ 1080	6 ~ 10		
6 ~ 8	800 ~ 850	15 ~ 20	1070 ~ 1080	10 ~ 13		
9 ~ 12	800 ~ 850	20 ~ 25	1080 ~ 1100	13 ~ 15		
13 ~ 16	800 ~ 850	25 ~ 30	1080 ~ 1100	14 ~ 16		
17 ~ 20	800 ~ 850	30 ~ 35	1080 ~ 1100	16 ~ 20		
21 ~ 25	800 ~ 850	35 ~ 40	1080 ~ 1100	19 ~ 23		

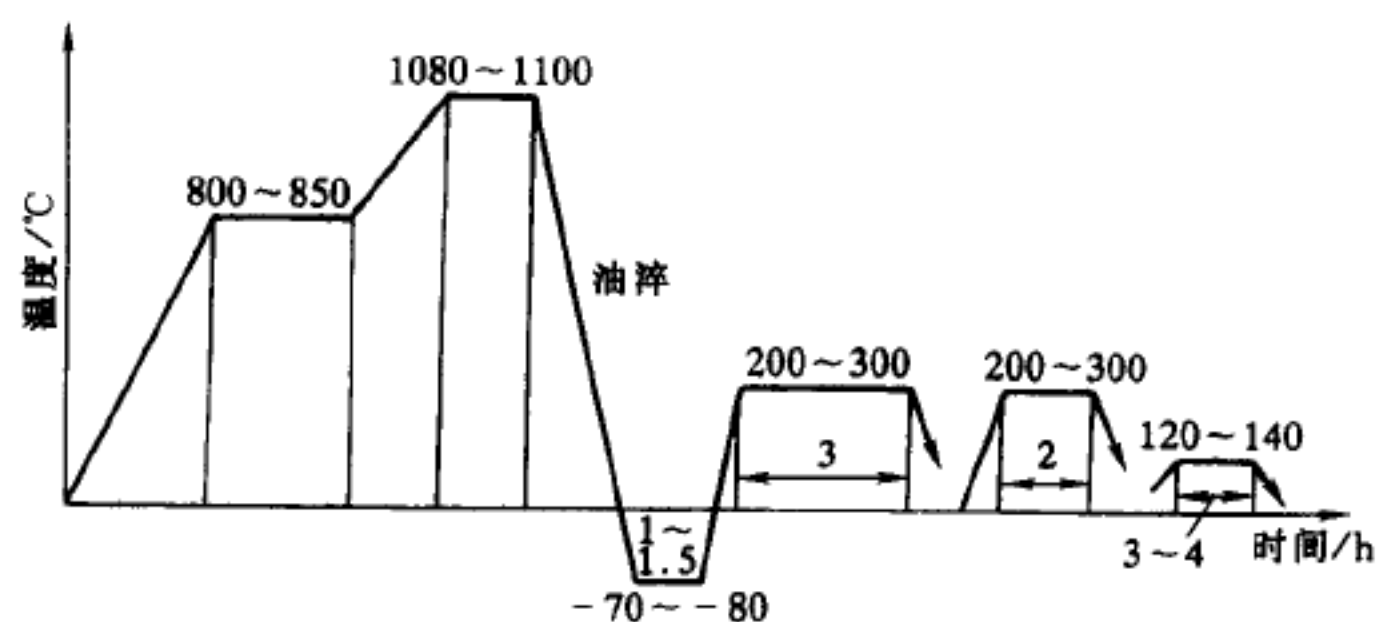
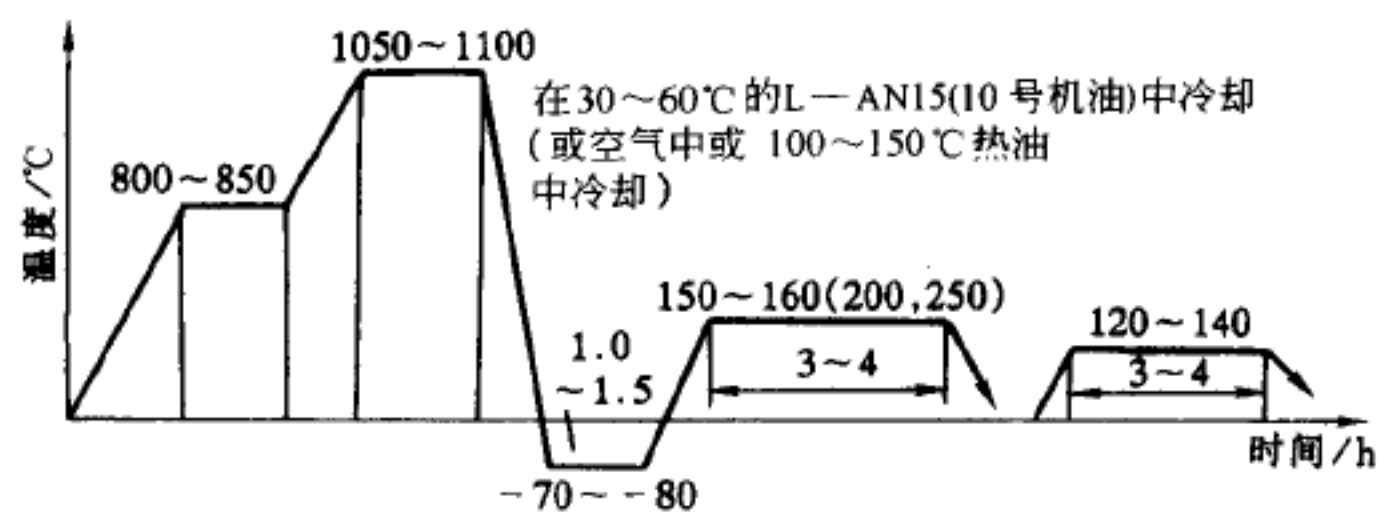
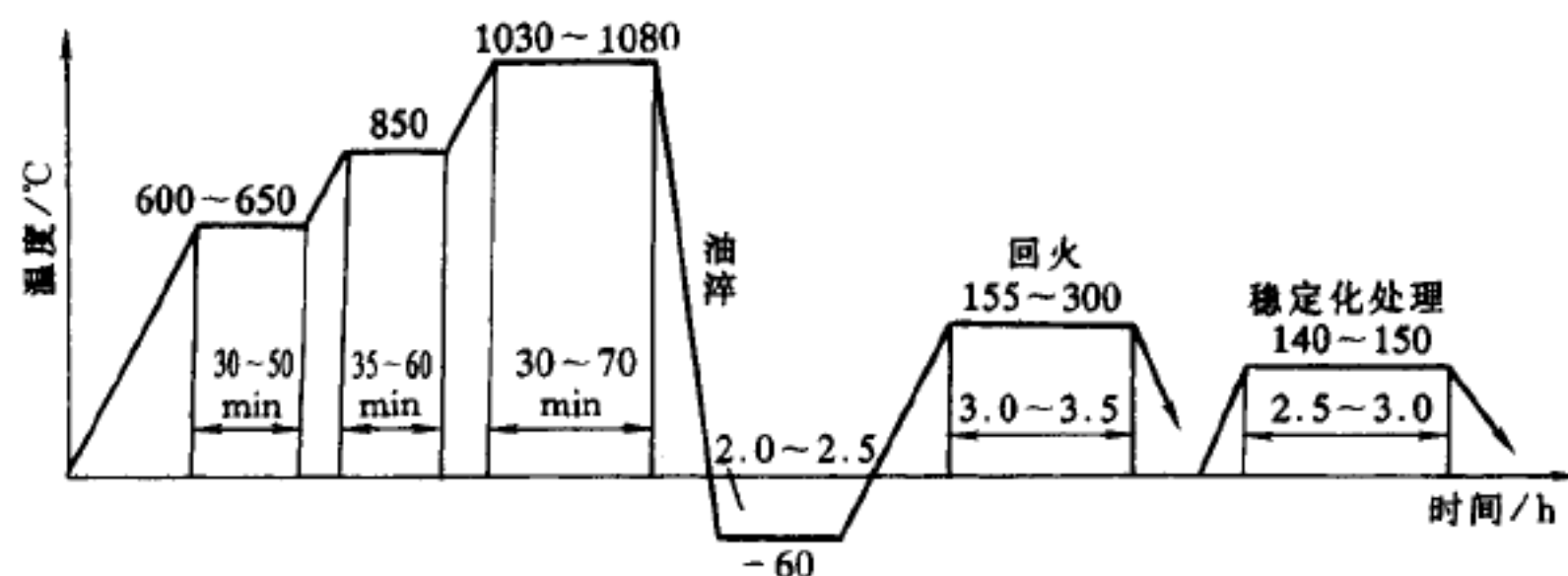
图 18-36 9Cr18 钢高温回火轴承零件热处理工艺曲线
(预热和淬火保温时间参阅表 18-39)图 18-37 工作温度 -253 ~ 100°C 轴承零件热处理工艺曲线
(预热和淬火保温时间参阅表 18-39)

图 18-38 9Cr18 钢在真空炉中的热处理工艺

表 18-40 9Cr18 钢轴承零件淬火回火后硬度要求

轴承回火代号	回火温度 /℃	套圈滚动体硬度 HRC	轴承回火代号	回火温度 /℃	套圈滚动体硬度 HRC
T	150 ~ 160	≥ 58	T ₃	250	≥ 54
T ₂	200	≥ 56		300	≥ 53

表 18-41 不锈钢轴承零件渗氮工艺

钢 号	渗 氮 规 范			渗氮层深度 /mm	渗氮层表面硬度 HV
	温度/℃	时间/h	分解率(%)		
1Cr18Ni9Ti (1Cr18Ni9, 0Cr18Ni9)	I 560	30	45 ~ 55	0.15 ~ 0.20	950 ~ 1150
	II 580	20	55 ~ 65		
	I 560	8	25 ~ 40	0.15 ~ 0.20	950 ~ 1150
	II 560	34	40 ~ 60		
	III 580	3	85 ~ 95		
	560	48 ~ 60	40 ~ 50	0.15 ~ 0.25	900 ~ 1200
1Cr13	580	80	35 ~ 55	0.2 ~ 0.3	900 ~ 1200
	500	48	18 ~ 25	0.15	1000
	600	48	30 ~ 50	0.30	900
	500 ~ 520	55	20 ~ 40	0.15 ~ 0.25	950 ~ 1100
	540 ~ 560	55	40 ~ 55	0.25 ~ 0.35	850 ~ 950
2Cr13	I 530	18 ~ 22	35 ~ 45	≥ 0.25	≥ 650
	II 580	15 ~ 18	50 ~ 60		
	500	48	20 ~ 25	0.12	1000
	560	48	35 ~ 55	0.26	900

(2) 力学性能(图 18-39 ~ 图 18-49)

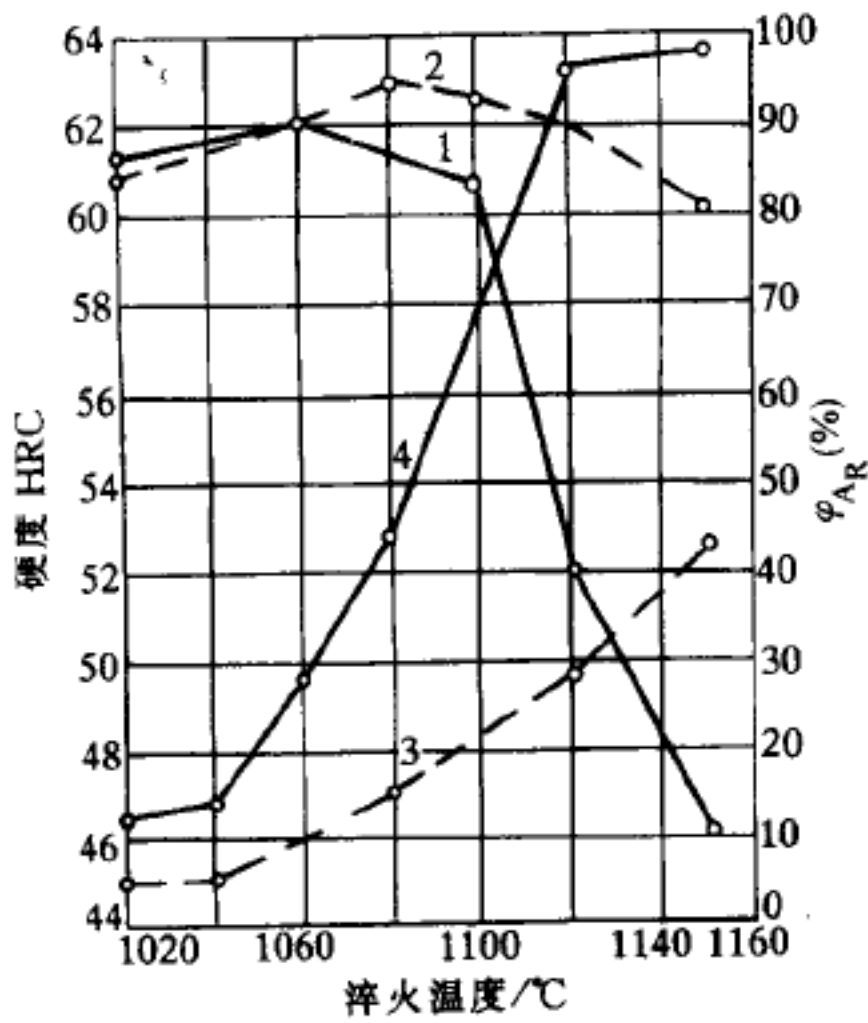


图 18-39 9Cr18 钢淬火温度,冷处理对硬度和残留奥氏体含量的影响

1—淬火后的硬度 2—-196℃冷处理后的硬度 3—淬火后的残留奥氏体量 4—冷处理后的残留奥氏体量

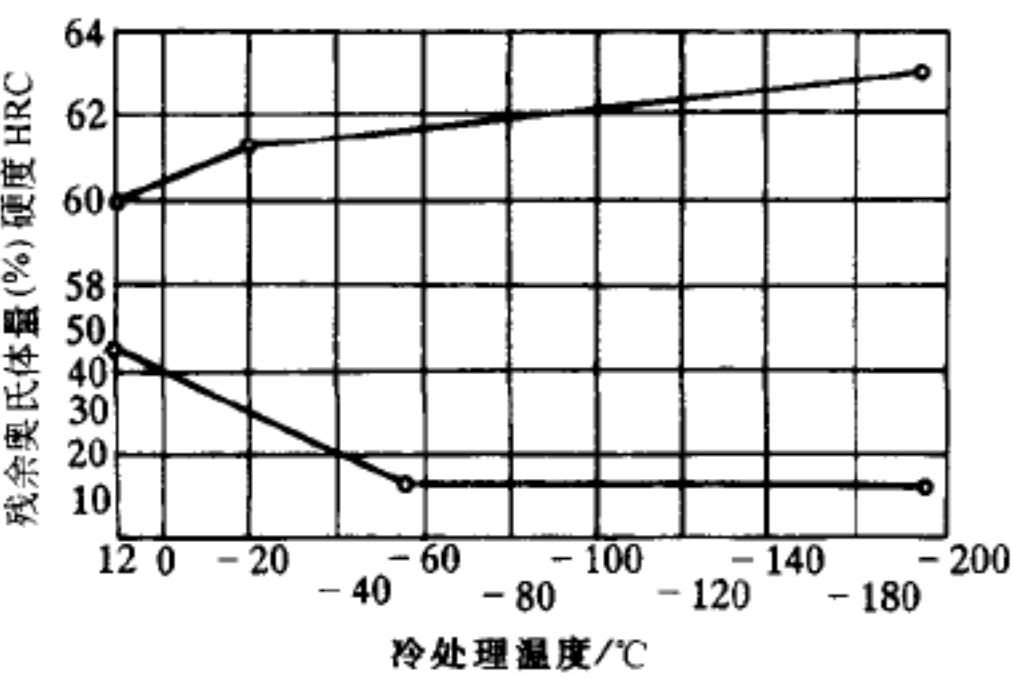


图 18-40 9Cr18 钢冷处理温度对硬度和残留奥氏体含量的影响

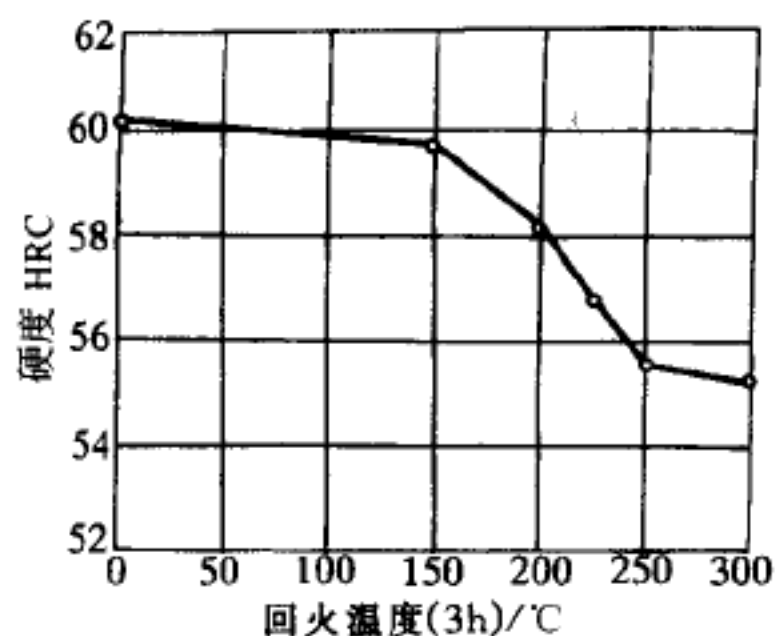


图 18-41 9Cr18 钢回火温度对硬度的影响
(w_C 0.99%, w_{Cr} 18.05%, w_{Mn} 0.33%, w_{Si} 0.33%; 淬火 1060℃, -70℃ 以下冷处理 1h, 回火时间 3h)

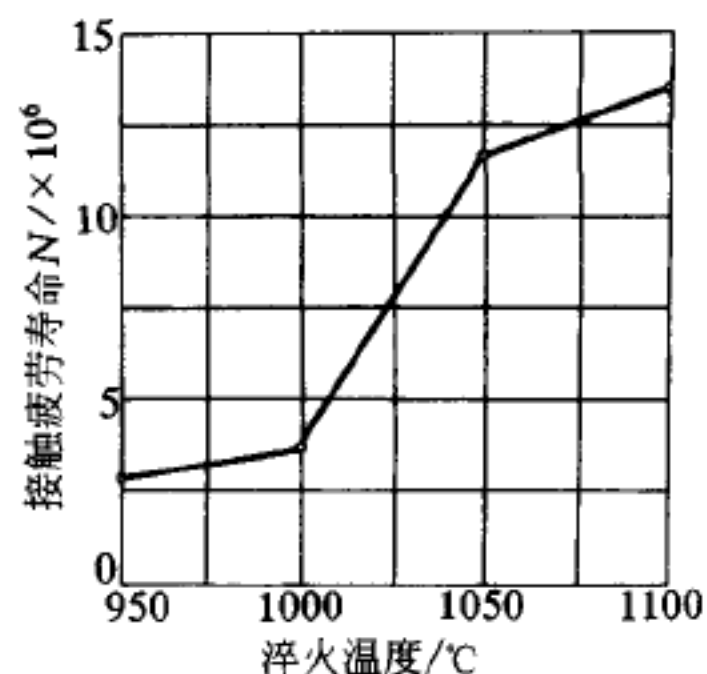


图 18-42 9Cr18 钢淬火温度对接触疲劳寿命的影响
(w_C 0.99%, w_{Si} 0.26%, w_{Mn} 0.27%, w_{Cr} 18.1%; w_P 0.025%, w_S 0.010%; 接触应力 5400MPa)

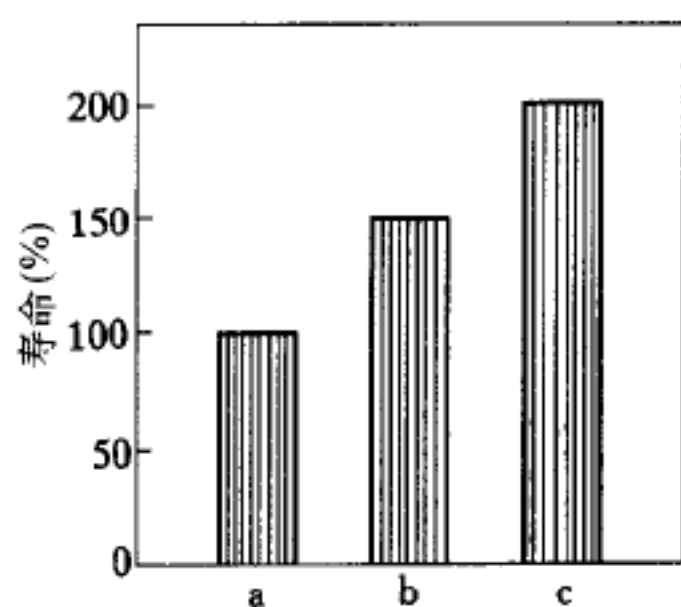


图 18-43 9Cr18 钢热处理对接触疲劳寿命的影响
a—淬火后无冷处理 b—1070℃ 淬火后, -70℃ 冷处理, 150℃ 回火 c—1100℃ 淬火后, -70℃ 冷处理, 150℃ 回火

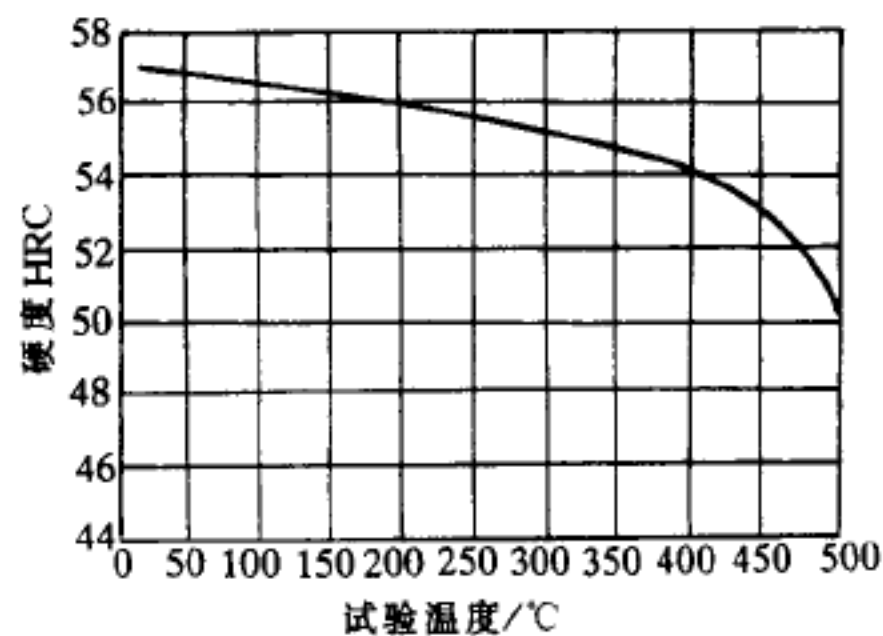


图 18-44 9Cr18 钢的高温硬度

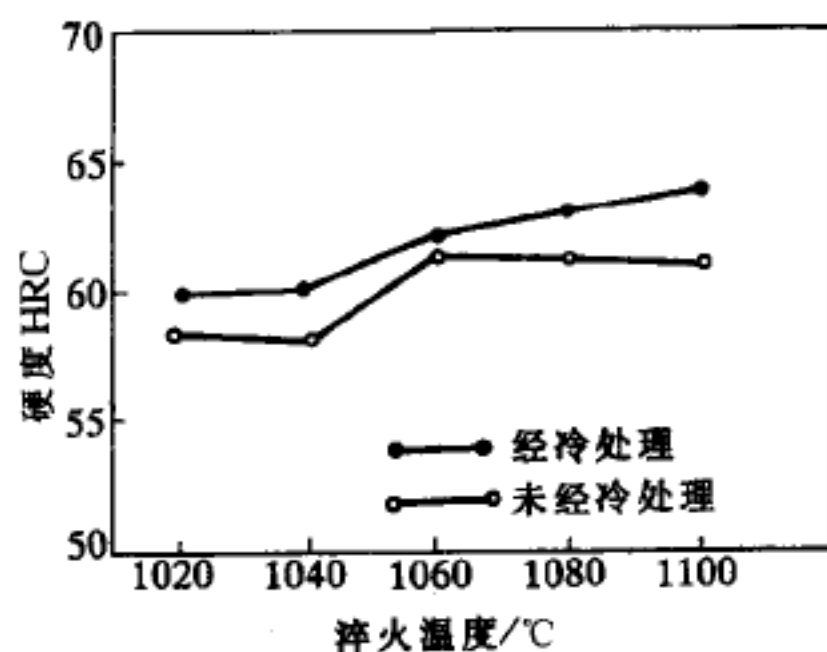


图 18-45 淬火温度和冰冷处理对 9Cr18Mo 钢硬度的影响

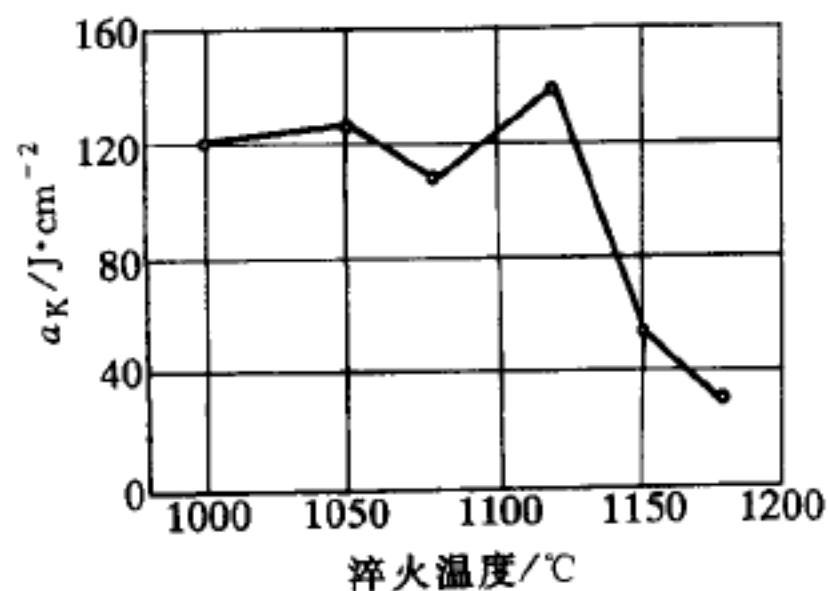


图 18-46 9Cr18Mo 钢冲击韧度与淬火温度的关系
(回火 530℃ × 2h × 3 次, 在 250℃ 条件下进行冲击试验)

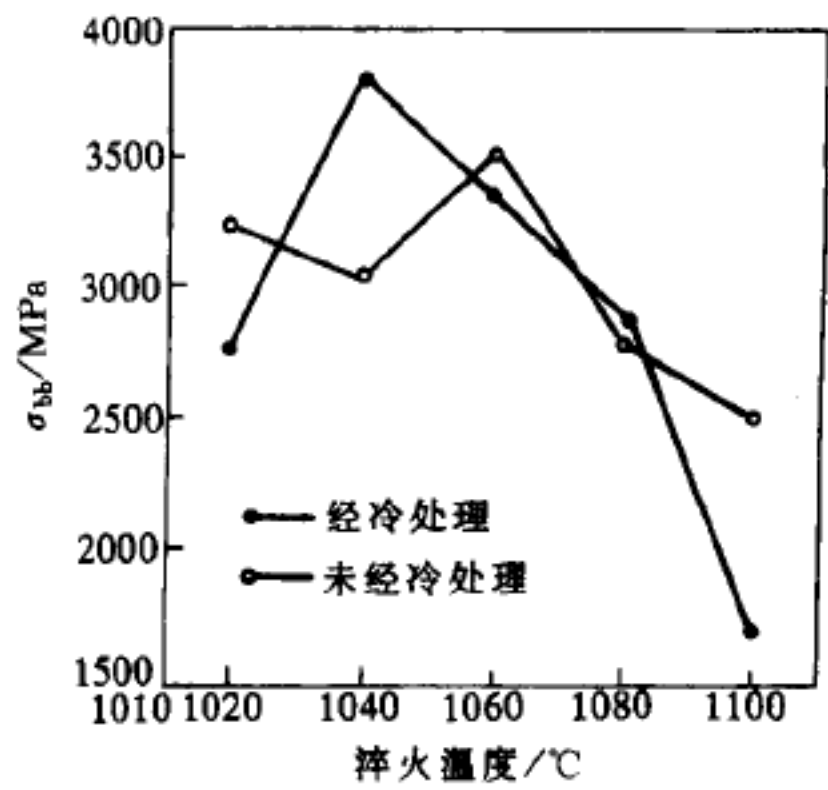


图 18-47 淬火温度和冰冷处理
对 9Cr18Mo 钢抗弯强度的影响

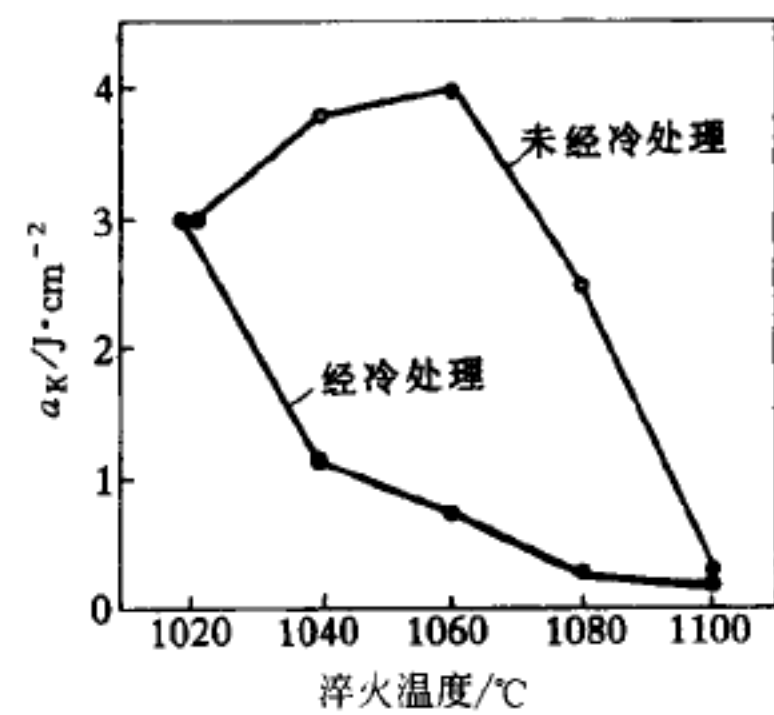


图 18-48 淬火温度和冰冷处理
对 9Cr18Mo 钢冲击韧度的影响

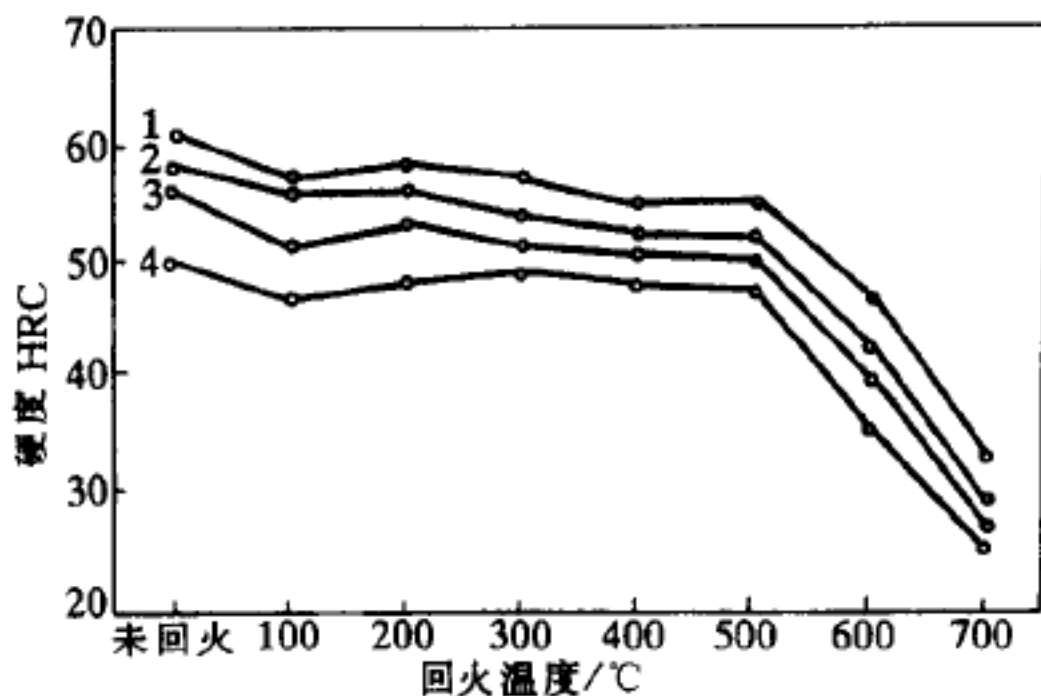


图 18-49 9Cr18Mo 钢硬度与回火温度的关系
(曲线上温度为回火前淬火温度)
1—1100℃空冷 2—1050℃空冷 3—1000℃空冷 4—950℃空冷

5. 中、高温轴承钢热处理工艺和性能

(1) 热处理工艺(图 18-50 和图 18-51,表 18-42 ~ 表 18-45)

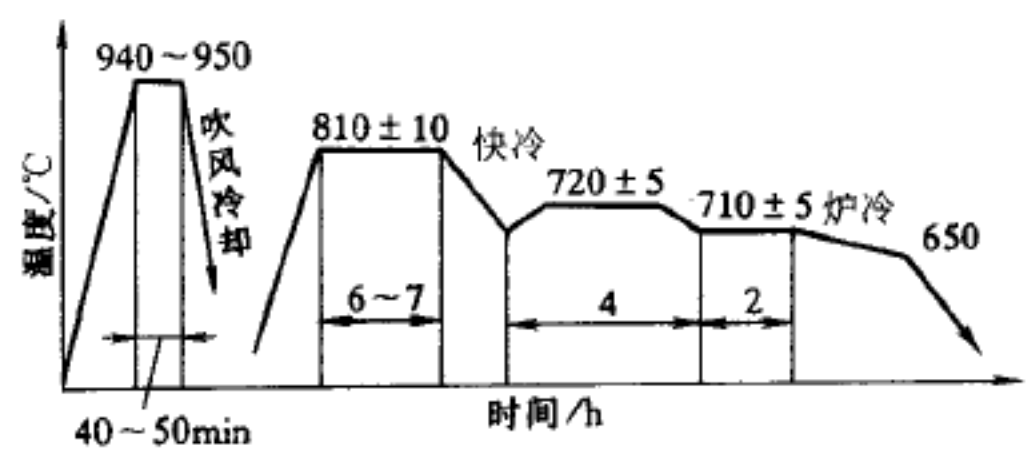


图 18-50 中温钢制轴承零件
正、退火工艺

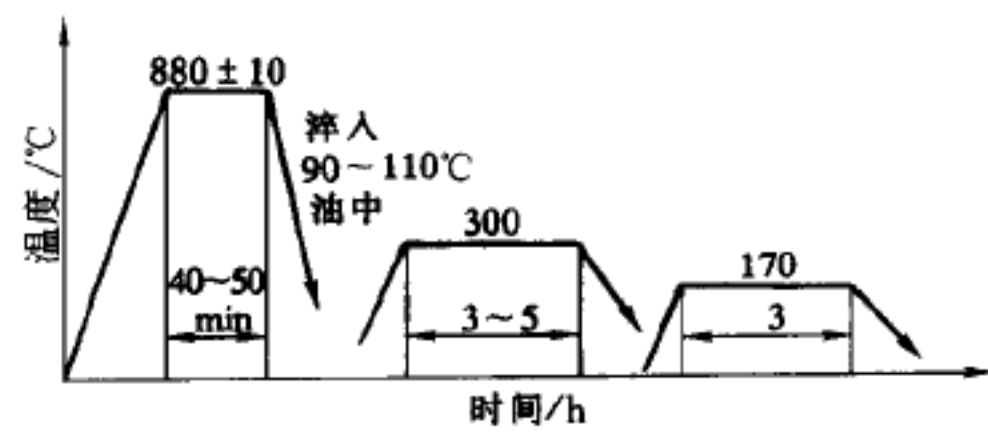


图 18-51 中温钢制轴承零件淬、回火
及稳定化处理工艺

表 18-42 中温钢制零件锻造工艺

锻造设备	装 料	锻造加热工艺	终锻温度	锻件冷却
箱式煤气炉加热用 400kg 锤锻造 250 扩孔机 辗压	单层摆放	预热: 温度 800 ~ 900℃ 保温 40 ~ 50min 加热: 温度 1100 ~ 1140℃ 保温 20 ~ 25min	900 ~ 950℃	堆 冷

表 18-43 高温钢制轴承零件退火工艺

零件名称	钢 号	技 术 要 求	退火名称	退 火 工 艺
锻造的 内外套和 热冲钢球	Cr4Mo4V	1. 硬度: 退火后硬度应为 179 ~ 241HBW 2. 脱碳层: 套圈和滚柱脱 碳层的深度不得超过车加工 每边留量的 2/3。钢球脱碳 层深度不得超过软磨每边留 量的 2/3	一般退 火	
锻造的 内外套和 热冲钢球	Cr4Mo4V	1. 硬度: 退火后硬度应为 179 ~ 241HBW 2. 脱碳层: 套圈和滚柱脱 碳层的深度不得超过车加工 每边留量的 2/3。钢球脱碳 层深度不得超过软磨每边留 量的 2/3	等温退 火	
冷冲球	Cr4Mo4V	1. 硬度: 退火后硬度应为 179 ~ 241HBW 2. 脱碳层: 套圈和滚柱脱 碳层的深度不得超过车加工 每边留量的 2/3。钢球脱碳 层深度不得超过软磨每边留 量的 2/3	低温退 火	
热冲球 与半热冲 球	W18Cr4V W9Cr4V2Mo	可参照 Cr4Mo4V	低温退 火	
锻造的 套圈和热 冲球	W18Cr4V W9Cr4V2Mo	可参照 Cr4Mo4V	等温退 火	

(续)

零件名称	钢 号	技 术 要 求	退火名称	退 火 工 艺
锻造的 套圈和热 冲球	Cr14Mo4V	可参照 Cr4Mo4V	等温退 火	
冷冲球 和半热冲 球	Cr14Mo4V	可参照 Cr4Mo4V	低温退 火	

表 18-44 高温钢制轴承零件淬火、回火工艺

零件名称	钢 号	技术要求	热 处 理 规 范	备 注
套 圈 和 滚 动 体	Cr4MoV	按 JB/T2850 标准之规 定		淬火 后零件 冷却到 室温立 即进行 深冷处 理(需 要时) 淬火后 ≥ 62HRC
套 圈 和 滚 动 体	W9Cr4V2Mo	可参照 JB2406 标 准之有关 规定	<p>1. 淬火在 80~130℃, L—AN15(L—AN22)[10 号(或 20 号)机械油]中冷却 2. 对于形状复杂的零件可在 800~820℃冷却 12s 左右, 然后在 100~150℃10 号油中冷却或在 200~250℃硝酸盐中冷却</p>	

(续)

零件名称	钢 号	技术要求	热 处 理 规 范	备 注
套圈 和滚动 体	W18Cr4V	可参照 JB2406 标 准之有关 规定		
套圈 和滚动 体	Cr12Mo4	可参照 JB/T2850 标准之有 关规定	<p>淬火在 30 ~ 80℃ L—AN15(或 L-AN32)[10 号(或 20 号)机械油]中冷却,对形 状复杂的零件亦可在 80 ~ 150℃ 油中冷却,对易畸变的套圈亦可空冷</p>	

注:1. 对形状复杂的零件,为减少畸变或裂纹,可采用两次预热,第一次温度为 500 ~ 650℃(箱式电炉用 500 ~ 520℃保温 1 ~ 2min/mm,盐炉用 600 ~ 650℃,保温 1min/mm),第二次为 800 ~ 830℃。

2. 为了防止在深冷处理过程中产生裂纹,必须待淬火零件冷到室温并继续到 -30℃ 以后再进行 -70 ~ -80℃ 深冷处理。

表 18-45 高温轴承用钢的选用温度

钢 号	最高工 作温度 /℃	高温下的硬度		尺寸稳定性		抗氧 化性	附 注
		温度 /℃	硬度 HRC	时间 /h	容许尺寸的变化量(%)		
GCr15	180 ^①	20	≥ 16(≥ 58) ^②	3000	< 0.01	优	工作温度低于 120℃, 室温的硬度 ≥ 61HRC。工作温度在 120 ~ 150℃, 室温的硬度 ≥ 58HRC
		175	> 56	2500	< 0.01	良	
		230	> 54				
		200℃, 1000 小时后	52				
Cr4Mo4V	315 (425)	20	> 62	1200	< 0.005	良	室温的硬度 64HRC, 在下列温度, 保温 1000h 后高温硬度 200℃, 61HRC 315℃, 57HRC 425℃, 55HRC
		230	> 59				
		315	> 57				
		425	> 54				
W6Mo5Cr4V2	425	20	> 63	1200	< 0.005	良	室温的硬度 66HRC 在下列温度, 保温 1000h 后的高温硬度 200℃, 62HRC 315℃, 60HRC 425℃, 57HRC
		230	> 61				
		315	> 60				
		425	> 57			可	

(续)

钢 号	最高工 作温度 /℃	高温下的硬度		尺寸稳定性		抗氧 化性	附 注
		温度 /℃	硬度 HRC	时间 /h	容许尺寸的 变化量(%)		
W18Cr4V	480	20	65	1200	< 0.005	良	
		200	61				
		315	60				
		425	57				
		535	54				
W9Cr4V2Mo	480	20	61	1200	< 0.005	良	室温的硬度 64HRC, 在下列温度 下高温硬度: 300℃, 62HRC 400℃, 60HRC 500℃, 58HRC
		300	58				
		400	57				
		500	55				
Cr15Mo4	315 (425)	20	63	1200	< 0.005	优	
		320	57				
		430	54				
9Cr18	- 253 ~ 100 (350)	20	> 58	1200	< 0.01	优	室温的硬度 58 ~ 62HRC ≥ 55HRC
		100	> 56.5				
		200	> 56				
		300	55				
9Cr18Mo	- 253 ~ 100 (350)	20	≥ 58	1200	< 0.01	优	室温硬度 61HRC, 在下列温度下 的高温硬度: 200℃, > 57HRC 315℃, > 55HRC
		230	> 55				
		315	> 52				
12Cr2Ni3Mo5	400	200	700HV	1200	< 0.005	良	
		300	600HV				

① GCr15 的工作温度超过 120℃, 需经过特殊的热处理方可使用。括号内温度为最高允许的工作温度。

② 对尺寸稳定性有特殊要求, 则室温的硬度 ≥ 58HRC。

(2) 力学性能(图 18-52 ~ 图 18-58)

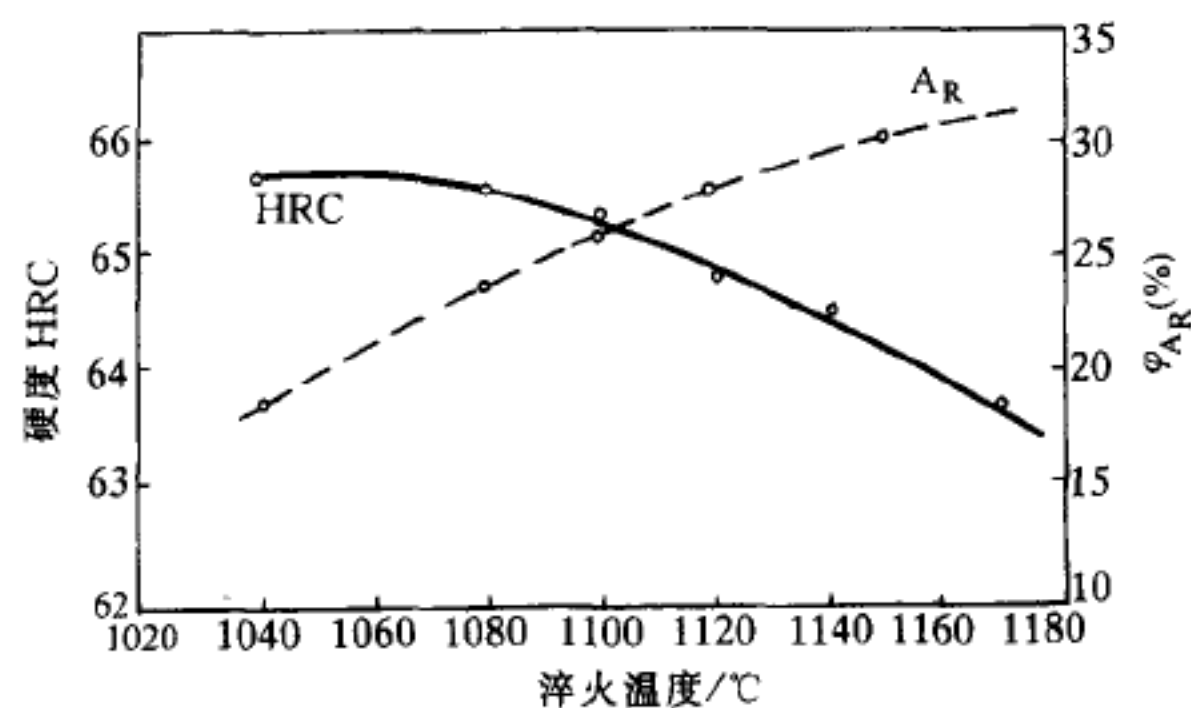


图 18-52 Cr4Mo4V 钢残留奥氏体量、硬度与淬火温度的关系

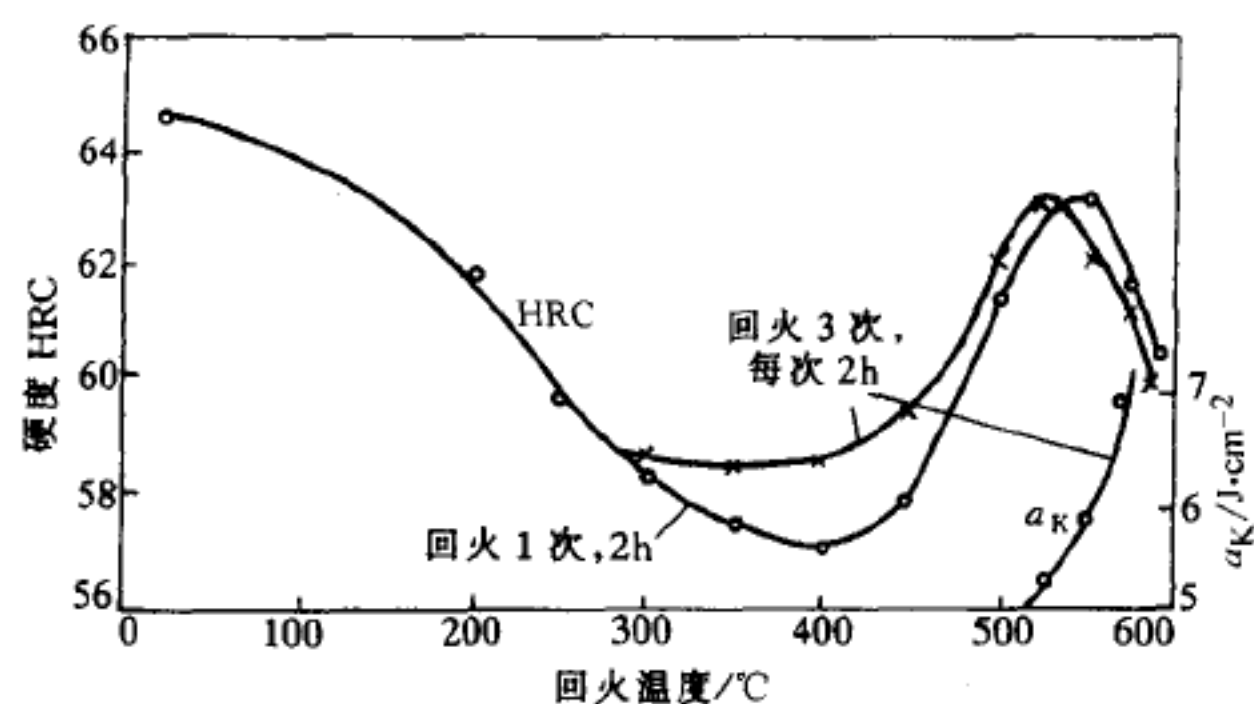


图 18-53 Cr4Mo4V 钢硬度与回火温度的关系
(1120 ~ 1150℃ 淬火, 然后不同温度回火)

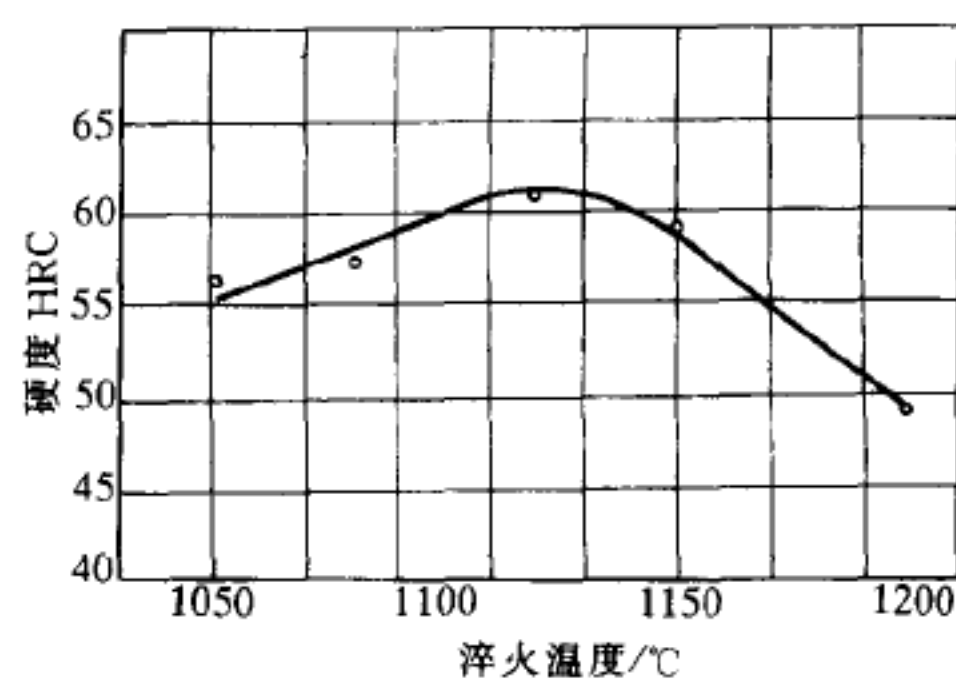


图 18-54 Cr14Mo4V 钢硬度与淬火温度的关系
(在指定温度下保温 5min 油冷)

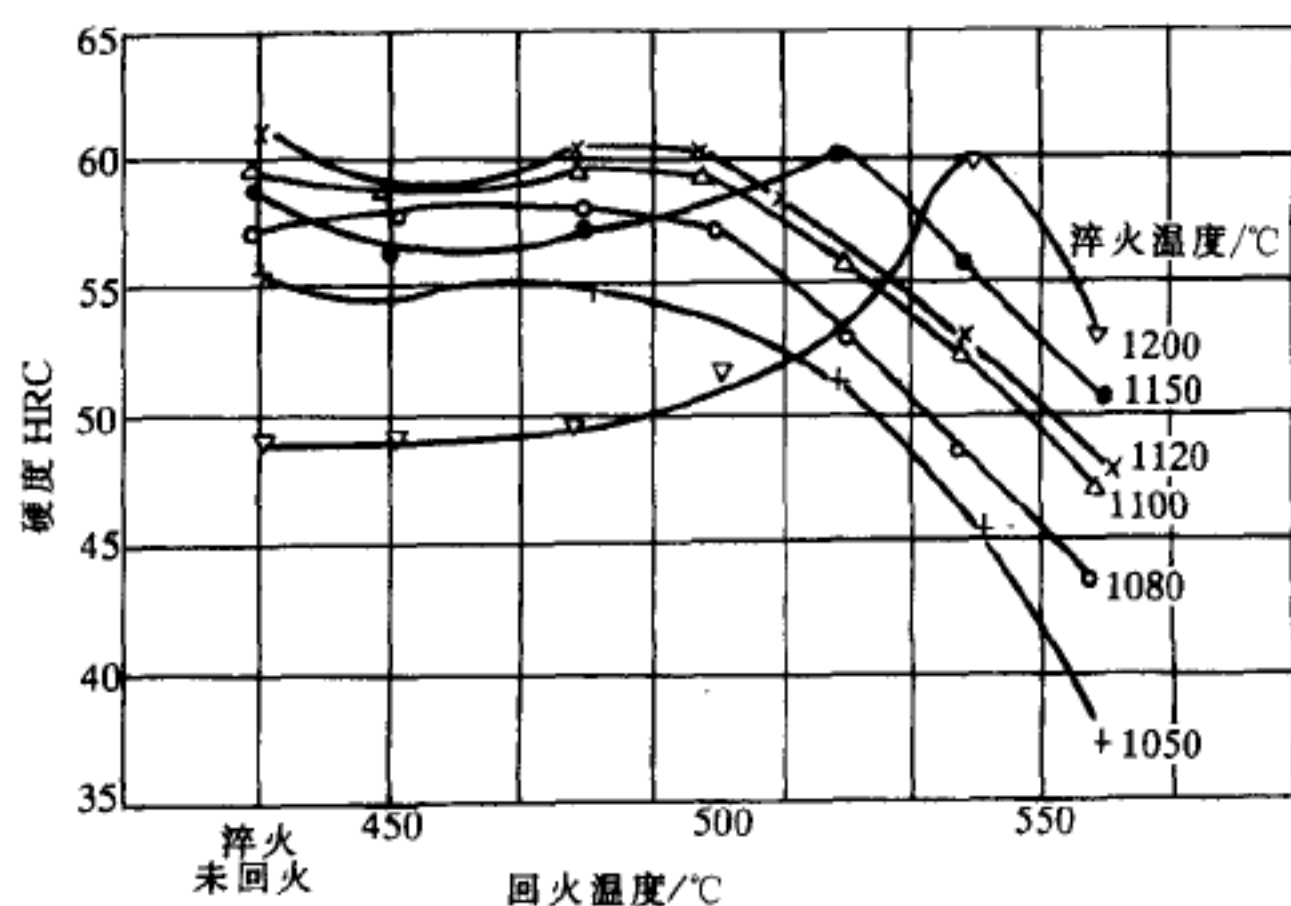


图 18-55 Cr14Mo4V 钢硬度与回火温度的关系

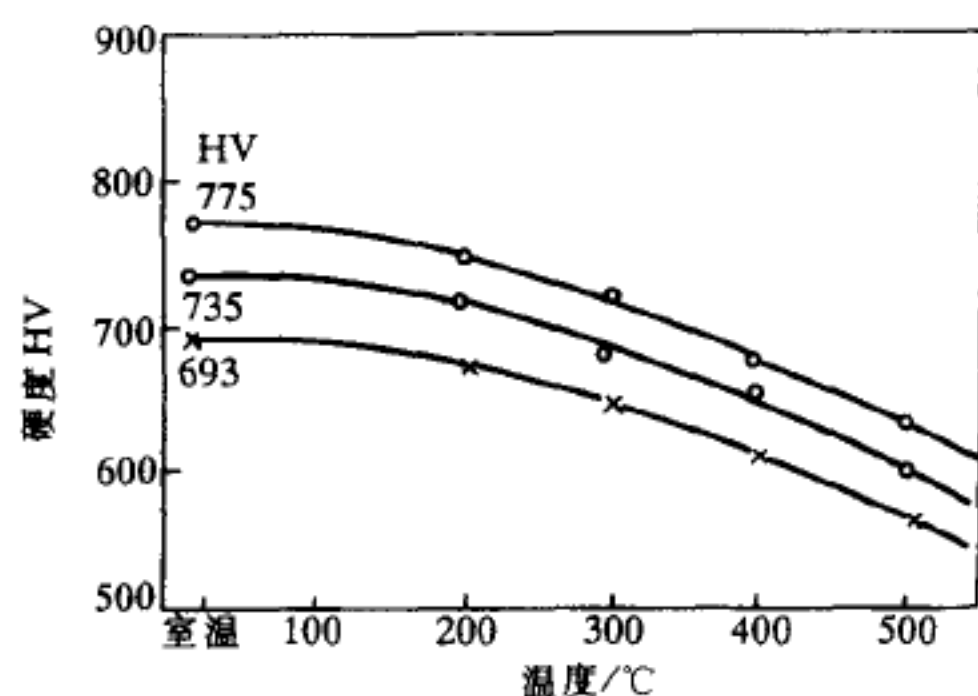


图 18-56 Cr4Mo4V 钢的高温硬度
(1120℃ 淬火, 530℃ 回火 2h, 回火 3 次)

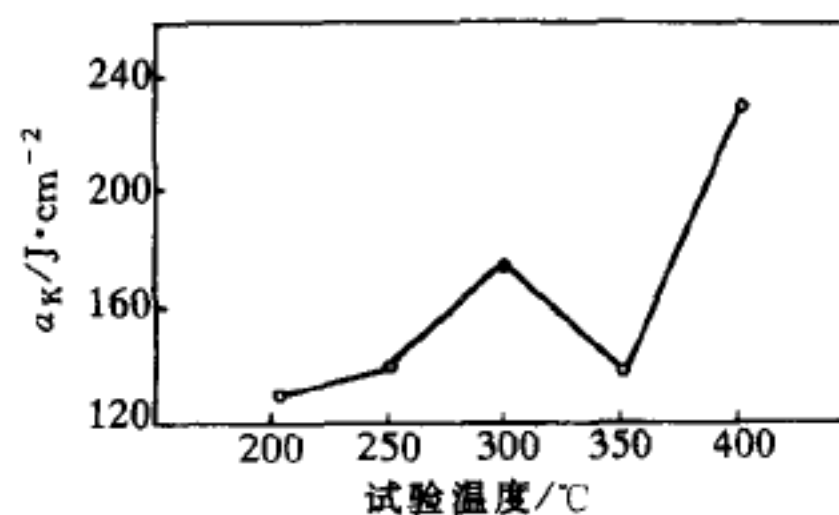


图 18-57 Cr4Mo4V 钢高温冲击韧性
(热处理: 1120℃ 10min 油淬, 530℃ 回火 2h, 回火 3 次)

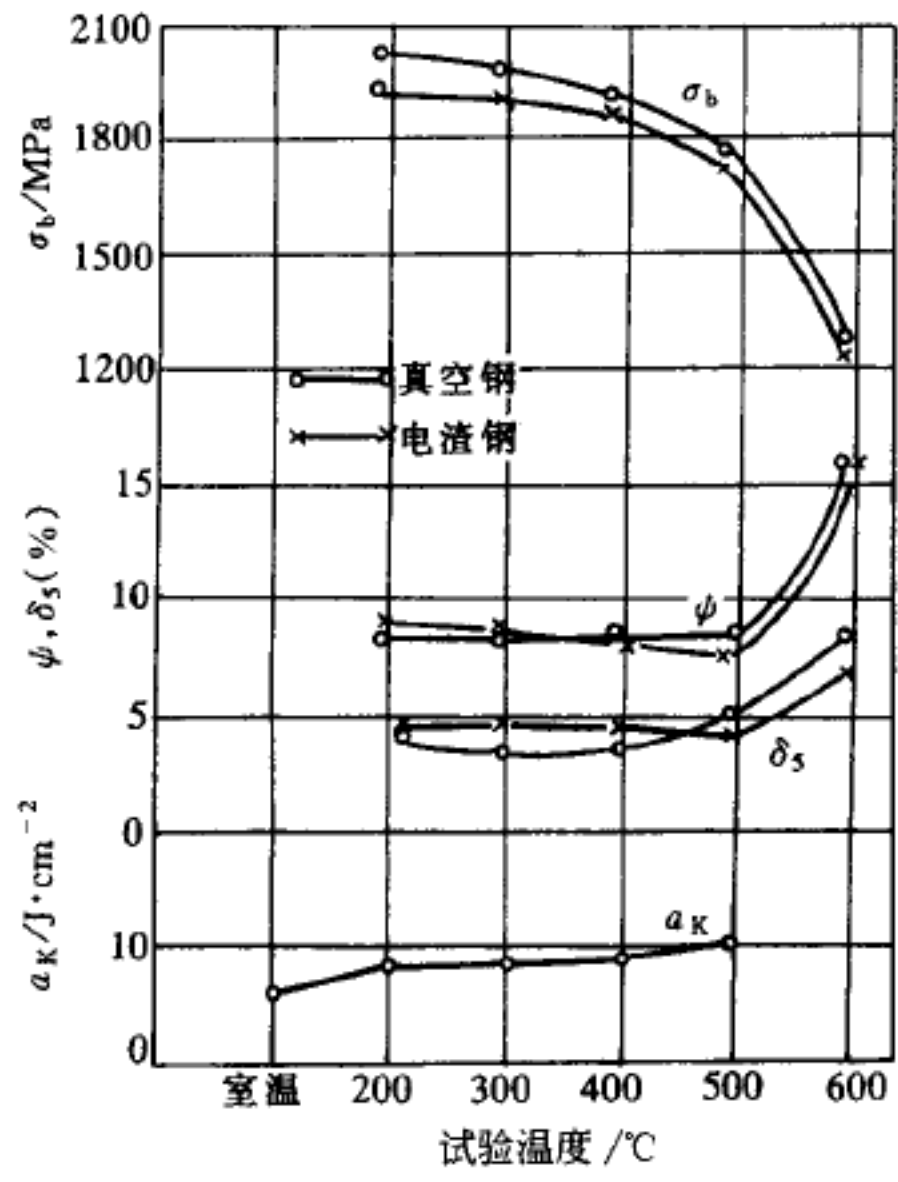


图 18-58 Cr14Mo4V 钢高温拉伸性能和冲击韧度
(1100℃油淬,500℃回火 5 次,每次回火 1h)

第 19 章 大型零件热处理

19.1 大型铸锻件化学成分、热处理工艺和性能

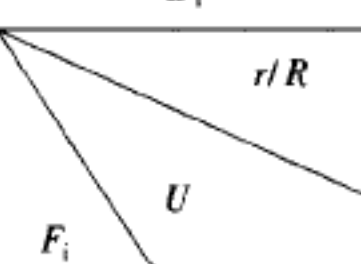
1. 大型锻件热处理工艺和性能

(1) 大型锻件中的氢(表 19-1 和表 19-2, 图 19-1 ~ 图 19-8)

表 19-1 氢在 α -Fe 及 γ -Fe 中的扩散系数

温 度 /℃	扩散系数/cm ² ·h ⁻¹		温 度 /℃	扩散系数/cm ² ·h ⁻¹	
	α -Fe	γ -Fe		α -Fe	γ -Fe
1500	1.43	1.90	645	0.777	—
1400	1.38	1.49	630	0.7665	—
1300	1.31	1.19	620	0.756	—
1200	1.25	0.90	610	0.7455	—
1100	1.19	0.684	600	0.735	0.056
1000	1.11	0.468	500	0.612	0.023
900	1.02	0.313	400	0.497	0.007
800	0.97	0.205	300	0.360	0.002
700	0.84	0.112	200	0.240	—
690	0.8295	—	100	0.008	—
660	0.798	—	50	0.004	—
650	0.7875	—	20	0.001	—

表 19-2 圆柱形锻件的 B_i 、 F_0 、 $\frac{r}{R}$ 与 U 之间的关系

B_i	4		6		10		15		30	
	0.0	0.5	0.0	0.5	0.0	0.5	0.0	0.5	0.0	0.5
0.02	0.99931	0.99266	—	0.99563	—	0.99176	—	0.99043	—	—
0.04	0.99786	0.96237	0.99886	0.95236	0.99758	0.93678	0.99810	0.92769	0.99839	0.91186
0.06	0.98970	0.90998	0.98805	0.88792	0.98335	0.85918	0.98104	0.84133	0.97798	0.82559
0.10	0.93439	0.79640	0.91635	0.75542	0.89935	0.70956	0.88728	0.68210	0.87109	0.64907
0.20	0.69869	0.55632	0.65034	0.49689	0.59981	0.43926	0.57119	0.40740	0.54186	0.37398
0.30	0.49164	0.38697	0.43206	0.32655	0.37361	0.27301	0.34668	0.24545	0.31547	0.21751
0.40	0.34242	0.26898	0.28441	0.21460	0.23430	0.16977	0.20906	0.14788	0.18369	0.12663
0.50	0.23806	0.18695	0.18696	0.14103	0.14574	0.10559	0.12654	0.08910	0.10695	0.07373
0.60	0.16547	0.12993	0.12286	0.09268	0.09064	0.06567	0.07589	0.05368	0.06227	0.04292
0.80	0.07992	0.06275	0.05306	0.04003	0.03506	0.02540	0.02754	—	0.02111	0.01455
1.00	0.03860	0.03031	0.02291	0.01729	0.01350	0.00982	0.01000	—	0.00716	—
1.20	0.01865	0.01464	0.00900	0.00747	0.00524	0.00380	0.00363	—	0.00243	—
1.40	0.00900	0.00707	0.00427	0.00322	0.00203	0.00147	0.00132	—	—	—
1.50	0.00626	0.00491	0.00281	0.00212	0.00126	0.00092	—	—	—	—

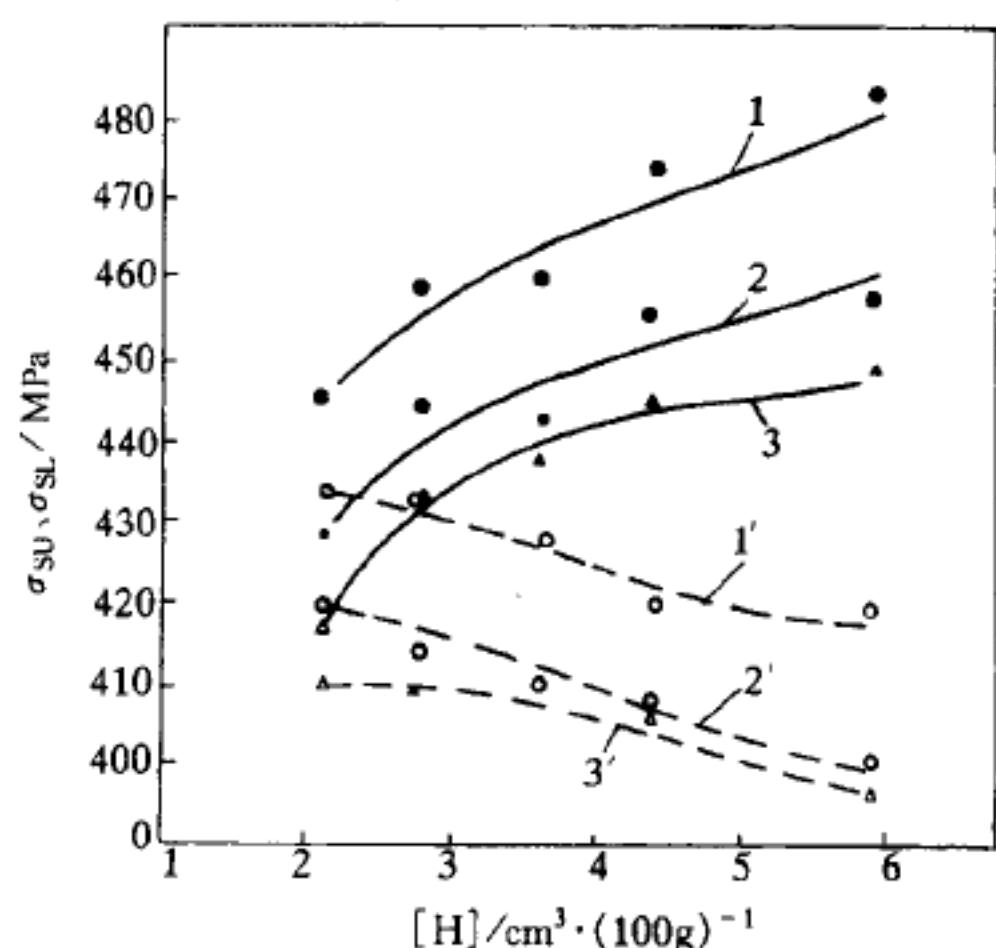


图 19-1 15MnVN 钢系列氢含量光滑拉深试样匀速拉深曲线中 σ_{SU} 与 σ_{SL} 随氢含量的变化曲线

图中:实线为 σ_{SU} , 虚线为 σ_{SL} , 1、1'— $1.67 \times 10^{-3} \cdot 1/s$

2、2'— $2.78 \times 10^{-4} \cdot 1/s$ 3、3'— $5.56 \times 10^{-5} \cdot 1/s$

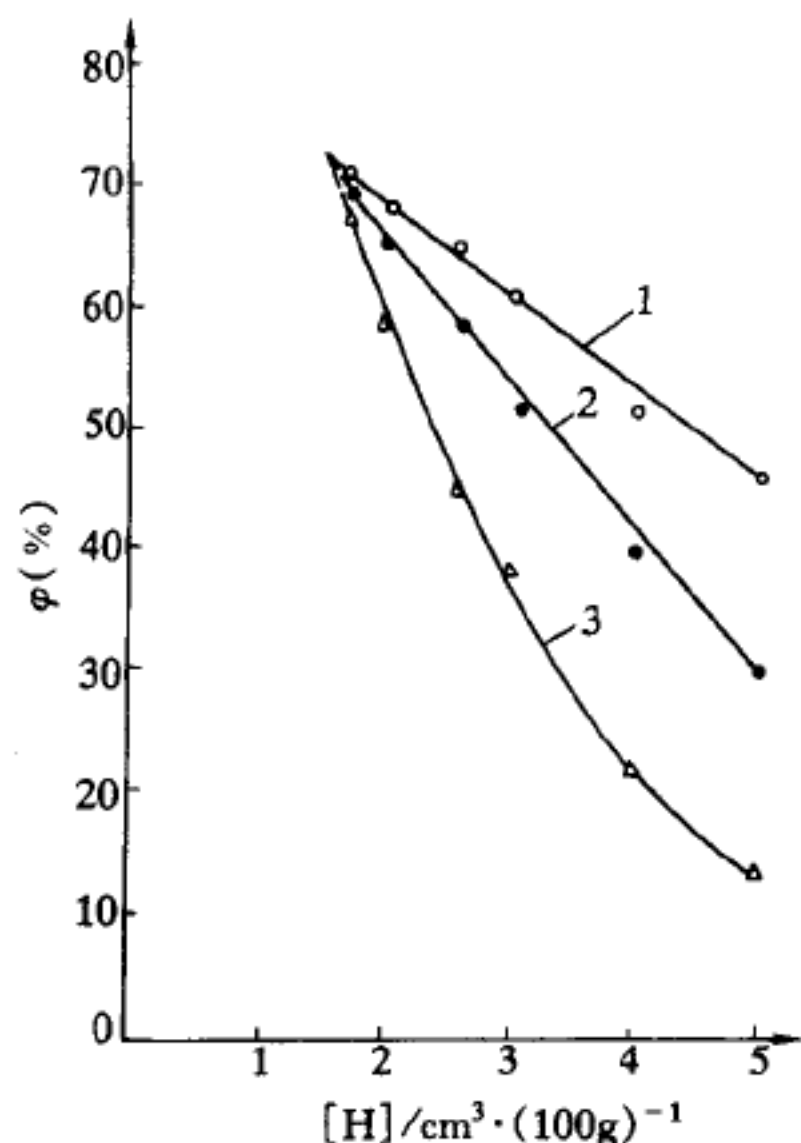


图 19-3 氢含量对 34CrNi3Mo 钢塑性指标的影响

1— $3 \times 10^{-3} 1/s$ 2— $3 \times 10^{-4} 1/s$ 3— $3 \times 10^{-5} 1/s$

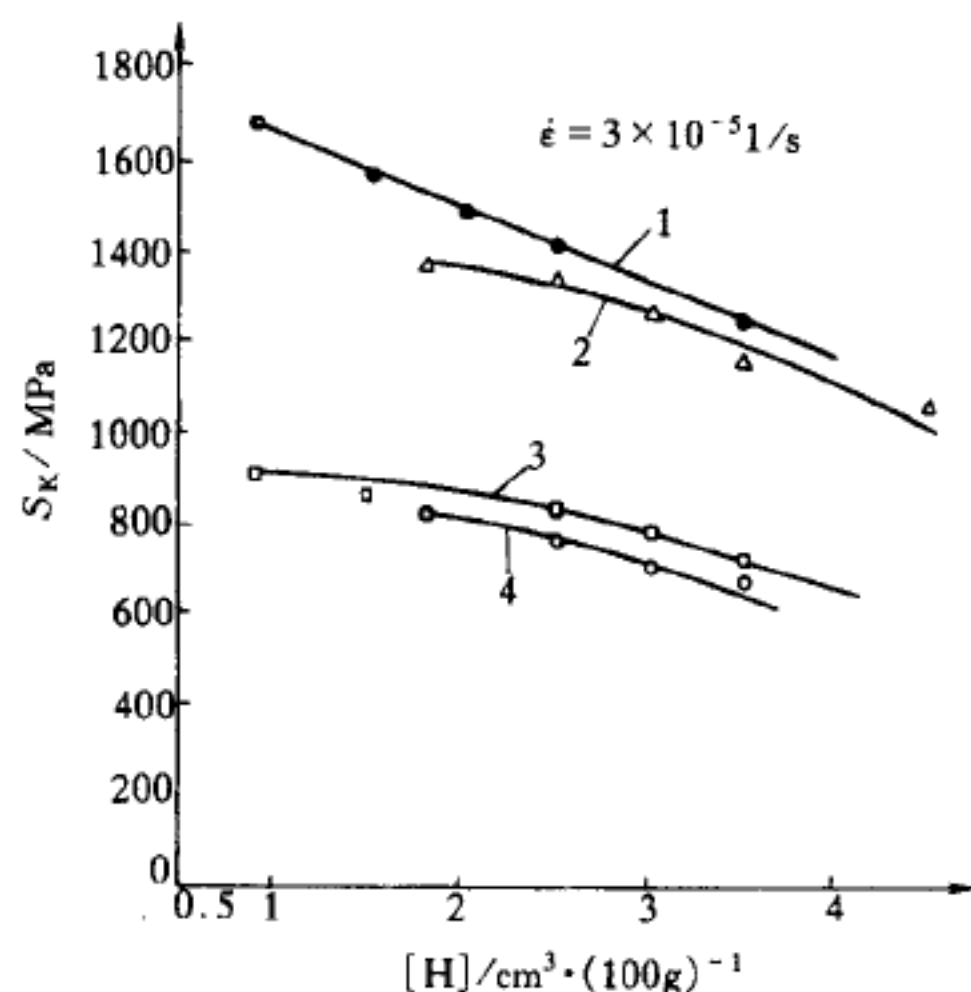


图 19-2 氢对四种大型锻件用钢断裂强度的影响

1—26Cr2Ni4MoV 2—9Cr2Mo

3—5CrNiMo 4—30CrNiMo1V

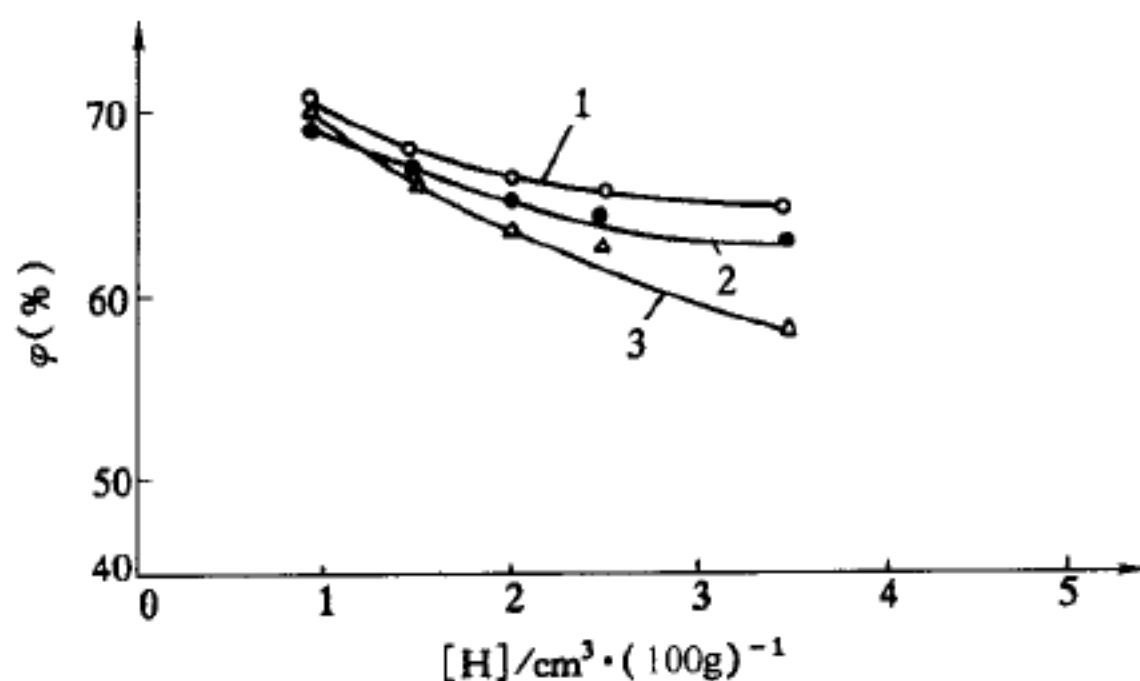


图 19-4 氢含量对大型发电机转子用钢 26Cr2Ni4MoV 塑性指标的影响

1— $3 \times 10^{-3} 1/s$ 2— $3 \times 10^{-4} 1/s$ 3— $3 \times 10^{-5} 1/s$

圆柱形大锻件的扩氢效果可利用如下准数方程进行定量计算:

$$U = \frac{H}{H_0} = \phi\left(\frac{D\tau}{R^2}, \frac{PR}{Q}, \frac{r}{R}\right)$$

式中 U ——锻件中氢的浓度准数;

H_0 ——去氢退火前锻件中的原始氢含量;

H ——去氢退火后锻件中的氢含量；

$\frac{D\tau}{R^2}$ ——为达到浓度准数 U 所必须的时间准数,通常称为福氏准数,以 F_0 表示。其中 D

为氢的扩散系数,可由表 19-1 查出; τ 为扩散时间(h), R 为圆柱形锻件的半径(cm);

$\frac{PR}{Q}$ ——毕氏准数,通常以 B_i 表示。其中 P 为渗透性系数, Q 为透过性系数。在计算毕氏

准数时,比值 P/Q 可近似取为 $\frac{1}{2.5}\text{cm}^{-1}$;

$\frac{r}{R}$ ——位置准数, r 为计算位置的半径(cm)。

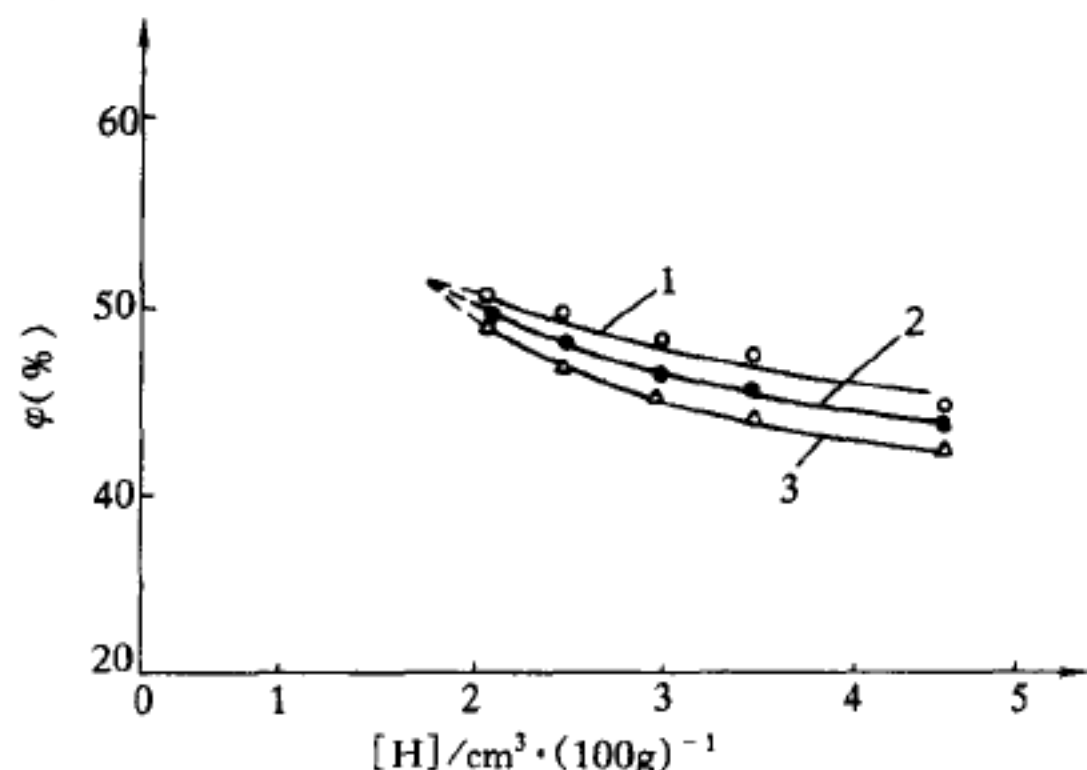


图 19-5 氢含量对汽轮机转子用钢
30CrNiMo1V 塑性指标的影响

1— $3 \times 10^{-3} 1/s$ 2— $3 \times 10^{-4} 1/s$ 3— $3 \times 10^{-5} 1/s$

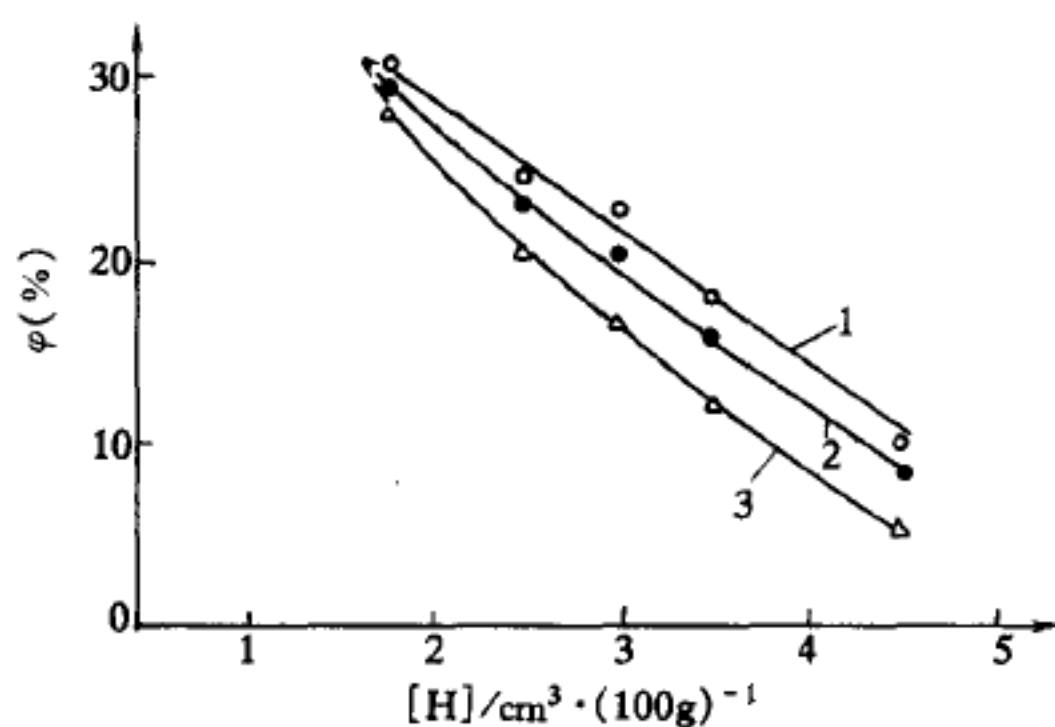


图 19-6 氢含量对大型冷轧辊用钢
9Cr2Mo 塑性指标的影响

1— $3 \times 10^{-3} 1/s$ 2— $3 \times 10^{-4} 1/s$ 3— $3 \times 10^{-5} 1/s$

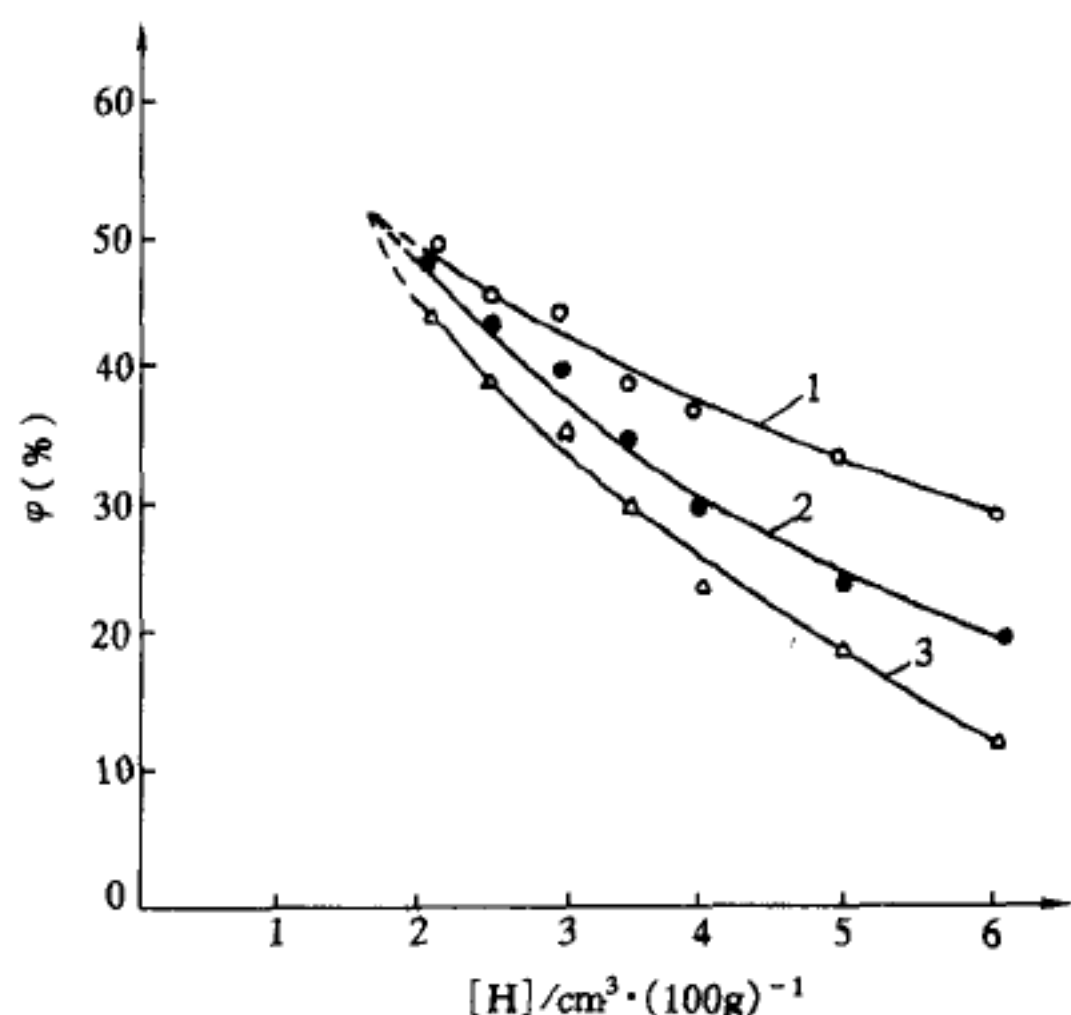


图 19-7 氢含量对大型轧辊用钢
70Cr3Mo 塑性指标的影响

1— $3 \times 10^{-3} 1/s$ 2— $3 \times 10^{-4} 1/s$ 3— $3 \times 10^{-5} 1/s$

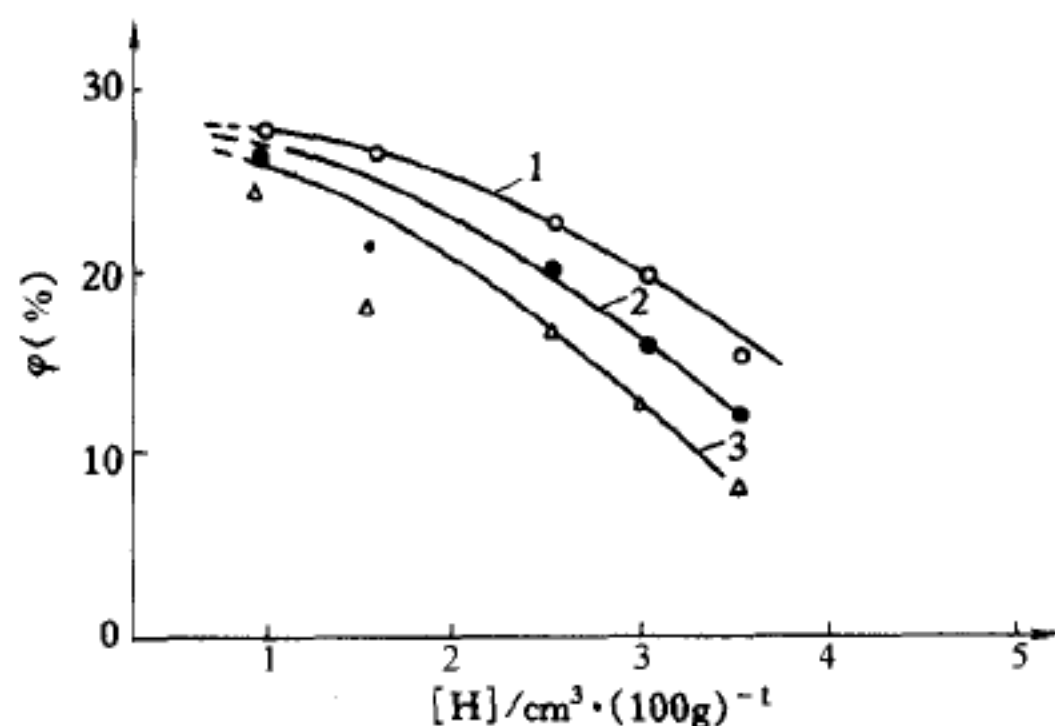


图 19-8 氢含量对大型热模具钢
5CrNiMo 塑性指标的影响

1— $3 \times 10^{-3} 1/s$ 2— $3 \times 10^{-4} 1/s$ 3— $3 \times 10^{-5} 1/s$

(2) 大型锻件热处理工艺

1) 预备热处理(表 19-3, 图 19-9 ~ 图 19-20)

表 19-3 各钢种正火(或退火)及高温回火温度

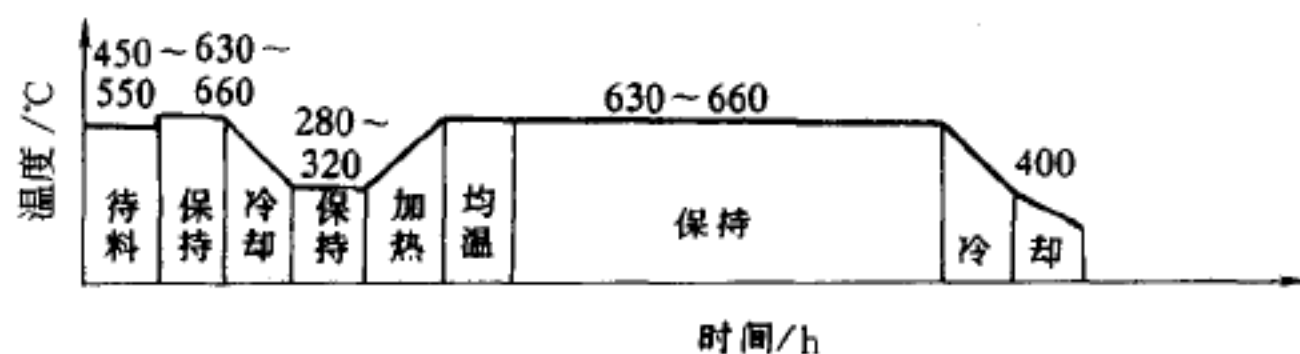
序号	钢 种	A_{c1} /℃	$A_{c3} (A_{cm})$ /℃	M_s /℃	正火或退火/℃		高温回火/℃	
					单独生产	配 炉	单独去氢	考虑性能
1	08	725	870	480	910 ~ 930	890 ~ 930	620 ~ 660	580 ~ 660
2	15	725	870	450	900 ~ 920	880 ~ 920	620 ~ 660	580 ~ 660
3	20	735	855	440	880 ~ 900	870 ~ 910	620 ~ 660	580 ~ 660
4	25	735	840		870 ~ 890	870 ~ 900	620 ~ 660	580 ~ 660
5	30	732	813	380	860 ~ 880	850 ~ 890	620 ~ 660	580 ~ 660
6	35	725	805	360	850 ~ 870	840 ~ 870	620 ~ 660	580 ~ 660
7	40	724	790	340	840 ~ 860	830 ~ 860	620 ~ 660	580 ~ 660
8	45	724	780	350	830 ~ 850	820 ~ 850	620 ~ 660	580 ~ 660
9	50	720	765	320	820 ~ 840	810 ~ 840	620 ~ 660	580 ~ 660
10	55	730	760	320	810 ~ 830	810 ~ 840	620 ~ 660	580 ~ 660
11	20Cr	740	815	390	880 ~ 900	870 ~ 920	630 ~ 660	
12	30Cr	755	810	350	860 ~ 880	850 ~ 890	630 ~ 660	
13	40Cr	730	780	330	840 ~ 860	830 ~ 880	630 ~ 660	
14	50Cr	721	771		830 ~ 850	820 ~ 860	630 ~ 660	
15	55Cr				820 ~ 840	820 ~ 850	630 ~ 660	590 ~ 660
16	16Mn	755	875	410	890 ~ 910	890 ~ 920	630 ~ 660	590 ~ 660
17	20Mn2	720	840	400	880 ~ 900	870 ~ 910	630 ~ 660	580 ~ 670
18	30Mn	730	800	320	850 ~ 870	840 ~ 880	630 ~ 660	580 ~ 670
19	50Mn	723	760	320	820 ~ 840	810 ~ 850	630 ~ 660	580 ~ 670
20	15CrMo	745	845	435	900 ~ 920	890 ~ 920	630 ~ 660	590 ~ 660
21	20CrMo	730	825	400	890 ~ 900	880 ~ 910	630 ~ 660	590 ~ 660
22	30CrMo	730	795	385	860 ~ 880	850 ~ 890	630 ~ 660	
23	34CrMo	730	800	330	850 ~ 870	840 ~ 880	630 ~ 660	
24	35CrMo	740	790	340	850 ~ 870	840 ~ 880	630 ~ 660	
25	12CrMo	735	780	325	840 ~ 860	830 ~ 870	630 ~ 660	
26	50CrMo	745	775	300	840 ~ 860	840 ~ 880	630 ~ 660	
27	34CrMo1	755	800	350	860 ~ 880	850 ~ 900	630 ~ 660	
28	24CrMo10	770	835	360	880 ~ 900	880 ~ 910	630 ~ 660	
29	20CrMo1(SCPH22)	736	869		910 ~ 930		630 ~ 660	
30	12Cr2Mo1(2.25Cr1Mo)	780	870	465	930 ~ 950	920 ~ 960	630 ~ 700	640 ~ 690
31	Cr5Mo	780	850	450	920 ~ 940	900 ~ 950	630 ~ 700	700 ~ 760
32	12Cr1MoV	774 ~ 803	882 ~ 914	400 ~ 430	960 ~ 980	960 ~ 990	630 ~ 700	720 ~ 760
33	24CrMoV(24CrMoV55)	770	835	410	900 ~ 950	880 ~ 950	630 ~ 700	680 ~ 740
34	35CrMoV	755 ~ 775	835 ~ 855		900 ~ 920		630 ~ 660	
35	30Cr2MoV	770 ~ 705	840 ~ 880	340	970 ~ 990		680 ~ 700	
36	30Cr1Mo1V	805	845	395	1020 ~ 1040		710 ~ 730	
37	38CrMoAl	760	885	360	940 ~ 960	930 ~ 970	630 ~ 700	
38	17MoV	745	910	440	950 ~ 970	930 ~ 970	630 ~ 710	640 ~ 710
39	20MnMo	730	845	380	880 ~ 900	870 ~ 900	630 ~ 660	580 ~ 660
40	18MnMoNb	736	850	370	900 ~ 920	900 ~ 950	630 ~ 660	580 ~ 660
41	20SiMn	732	840		900 ~ 920	880 ~ 930	630 ~ 660	580 ~ 660
42	35SiMn	750	830	330	880 ~ 900	870 ~ 900	630 ~ 660	
43	42SiMn	765	810	300	860 ~ 890	860 ~ 900	630 ~ 660	

(续)

序号	钢 种	A_{c1} /℃	A_{c3} (A_{cm}) /℃	M_s /℃	正火或退火/℃		高温回火/℃	
					单独生产	配 炉	单独去氢	考虑性能
44	50SiMn	760	785	280	840 ~ 860	830 ~ 870	630 ~ 660	
45	35CrMnMo	718	776		870 ~ 890	860 ~ 890	630 ~ 660	
46	40CrMnMo	735	780		840 ~ 860	830 ~ 870	630 ~ 660	
47	32Cr2MnMo	733	793	278	880 ~ 910	870 ~ 910	630 ~ 660	
48	20Cr2Mn2Mo	761	828	310	880 ~ 910	880 ~ 920	630 ~ 660	
49	18CrMnMoB	741	840	370	880 ~ 900	880 ~ 910	630 ~ 660	
50	30CrMn2MoB	724	815		880 ~ 900	870 ~ 900	630 ~ 660	
51	42MnMoV	718	796	320	870 ~ 890		630 ~ 660	
52	30Mn2MoV	695	832	290	880 ~ 900		630 ~ 660	
53	34Mn2MoB	734	800		850 ~ 870		630 ~ 660	
54	42SiMnMoV	748	832		870 ~ 890		630 ~ 660	
55	37SiMn2MoV	729	823	305	880 ~ 900		630 ~ 660	
56	37SiMnMoWV	722	836	290	880 ~ 900		630 ~ 660	
57	50SiMnMoB	737	772	230	820 ~ 840		630 ~ 660	
58	20CrMnTi	730	820	360	920 ~ 940	900 ~ 940	630 ~ 660	
59	12CrNi2	715	830	375 ~ 405	880 ~ 900	880 ~ 940	630 ~ 660	
60	20Cr2Ni4	685	775	305	890 ~ 910	880 ~ 920	630 ~ 660	
61	S15Cr2Ni2	735	825	410	880 ~ 900	880 ~ 940	630 ~ 660	
62	S17Cr2Ni2Mo	730	820	400	880 ~ 900	880 ~ 940	630 ~ 660	
63	S30Cr2Ni2Mo	740	810	320	850 ~ 870	850 ~ 880	630 ~ 660	
64	34CrNi1Mo	730	810	330	850 ~ 870	840 ~ 880	630 ~ 660	
65	34CrNi3Mo	705	750	290	850 ~ 870	840 ~ 880	630 ~ 660	
66	40CrNi	730	770	305	840 ~ 860	830 ~ 870	630 ~ 660	
67	50CrNi	735	755	300	830 ~ 850	820 ~ 860	630 ~ 660	
68	40CrNiMo	730	785	320	840 ~ 860	830 ~ 870	630 ~ 660	
69	40CrNi2Mo(4340)	732	774	290	840 ~ 860	830 ~ 870	630 ~ 660	
70	18Cr2Ni4W	695	800	310	920 ~ 940	900 ~ 950	630 ~ 660	
71	15CrNiMoW(H ₂ 102F)	725	820	440	940 ~ 960		640 ~ 660	
72	25Cr2NiMoV	735	835	384	940 ~ 960		630 ~ 660	
73	25CrNi3MoV	739	804	339	840 ~ 860	840 ~ 880	630 ~ 660	
74	26Cr2Ni4MoV	705	800	330	880 ~ 900	870 ~ 900	630 ~ 650	
75	5CrMnMo	700	760	220	840 ~ 860	830 ~ 870	630 ~ 660	
76	5CrNiMo	730	780	230	840 ~ 860	830 ~ 870	630 ~ 660	
77	5CrNiW	735		260	840 ~ 860	830 ~ 870	630 ~ 660	
78	5SiMn2W	706	777		840 ~ 860	830 ~ 860	630 ~ 660	
79	55SiMnMoV	764	788		840 ~ 860	830 ~ 860	630 ~ 660	
80	5CrSiMnMoV	773	820		870 ~ 890		630 ~ 660	
81	3Cr2W8V	800	850	380	840 ~ 860	840 ~ 880	630 ~ 660	
82	6Cr4Mo3Ni2WV	737	822	180	860 ~ 890		640 ~ 680	
83	4Cr5MoV1Si(H13)	850	910	335	850 ~ 870	850 ~ 890	630 ~ 670	
84	6CrW2Si	770	810	280	780 ~ 800		630 ~ 660	
85	60SiMnMo	699	761	264	810 ~ 830	820 ~ 850	630 ~ 660	
86	60CrMnMo	732	775		830 ~ 850	820 ~ 860	630 ~ 660	
87	60CrMnMo1	753	773	250	830 ~ 850	820 ~ 860	630 ~ 660	
88	50CrNiMo	752	776	270	840 ~ 860	830 ~ 870	630 ~ 660	
89	9Cr	740		230	780 ~ 800		650 ~ 670	

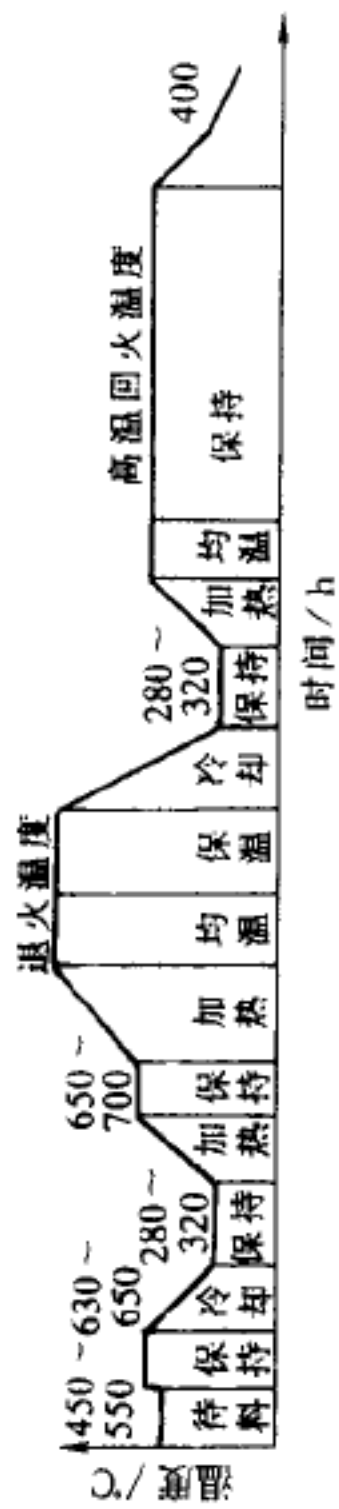
(续)

序号	钢 种	Ac_1 /°C	Ac_3 (Acm) /°C	M_s /°C	正火或退火/°C		高温回火/°C	
					单独生产	配 炉	单独去氢	考虑性能
90	9Cr2	740	840	270	780 ~ 800		650 ~ 670	
91	9Cr2Mo	780	880	175	780 ~ 800		650 ~ 670	
92	9Cr2W	740 ~ 750		230 ~ 240	780 ~ 800		650 ~ 670	
93	9CrV	740		185	780 ~ 800		650 ~ 670	
94	70Cr3Mo	785	825	195	940 ~ 960 780 ~ 800		650 ~ 670	
95	1Cr13	825		340	1000 ~ 1050		640 ~ 680	
96	2Cr13	810		300	1000 ~ 1050		640 ~ 680	
97	3Cr13	810	870	290	1000 ~ 1050		640 ~ 680	
98	22Cr12Mo1V	740 ~ 850		210	1040 ~ 1060		650 ~ 670	
99	T7	725	765	280	750 ~ 770	750 ~ 780	630 ~ 660	
100	T8	730	750	235	750 ~ 770	750 ~ 780	630 ~ 660	
101	T10	730	800	215	750 ~ 770	750 ~ 780	630 ~ 660	
102	T12	730	820	200	750 ~ 770	750 ~ 780	630 ~ 660	
103	GCr15	745	900	240	780 ~ 800		630 ~ 660	
104	GCr15SiMn	770	872	210	780 ~ 800		630 ~ 660	
105	16CrNi2Mo	720	790	400	840 ~ 860	830 ~ 870	630 ~ 660	
106	28Cr5Mo	770	850	420	890 ~ 910	880 ~ 910	630 ~ 660	
107	20Ni3Mo	690	790	380	840 ~ 860	830 ~ 870	630 ~ 660	
108	20Ni2Mo	690	840	430	880 ~ 900	870 ~ 910	630 ~ 660	



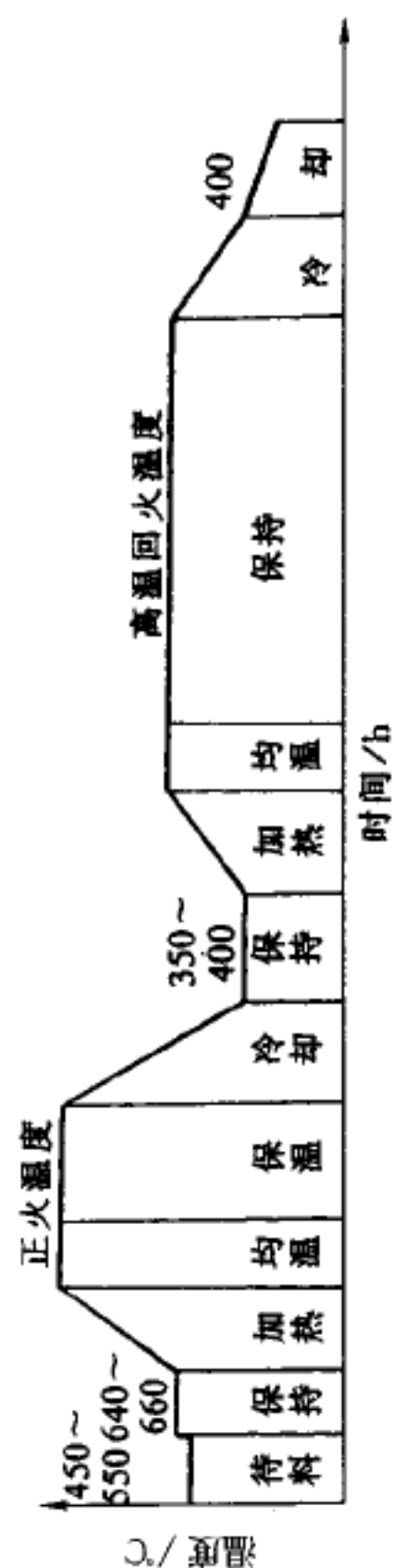
组别	钢 号	截面 /mm	待料 /h	保持(h)按钢锭氢含量(10^{-6})确定					冷却/°C $\cdot h^{-1}$		出炉温度 /°C
				≤ 2.5	3.5	4.5	6	7	\leq	\leq	
I	15 ~ 55	≤ 300	—	6 ~ 9	6 ~ 9	12 ~ 18	25 ~ 40	35 ~ 50	60	—	500
		301 ~ 500	—	9 ~ 15	9 ~ 15	18	40 ~ 60	50 ~ 85	50	—	400
		501 ~ 800	—	15 ~ 24	15 ~ 24	18 ~ 65	60 ~ 175	85 ~ 250	50	30	300
II	16Mn ~ 30Mn 20Mn2 20Cr ~ 40Cr 15CrMo ~ 35CrMo 20SiMn ~ 35SiMn 20MnMo 18MnMoNb 20CrMnTi	≤ 300	—	6 ~ 9	10 ~ 15	25 ~ 35	35 ~ 55	45 ~ 65	60	—	400
		301 ~ 500	—	9 ~ 15	15	35 ~ 50	55 ~ 100	65 ~ 125	50	30	300
		501 ~ 800	—	15 ~ 24	15 ~ 52	50 ~ 150	100 ~ 265	125 ~ 340	40	20	250
III	50Mn 55Cr 12Cr2Mo1 20Cr1Mo1 1Cr5Mo 34CrMo1 42CrMo 50CrMo 12Cr1MoV 17MoV 24CrMoV 35CrMoV 35CrMnMo 40CrMnMo 38CrMoAl 42SiMn 50SiMn 1Cr13 2Cr13 3Cr13	≤ 300	—	8 ~ 12	15 ~ 22	25 ~ 40	40 ~ 60	45 ~ 70	50	—	400
		301 ~ 500	—	12 ~ 20	22	40 ~ 60	60 ~ 110	70 ~ 140	40	20	300
		501 ~ 800	—	20 ~ 32	22 ~ 80	60 ~ 180	110 ~ 295	140 ~ 360	30	15	250

图 19-9 锻后热处理工艺曲线(一)锻后等温缓冷工艺



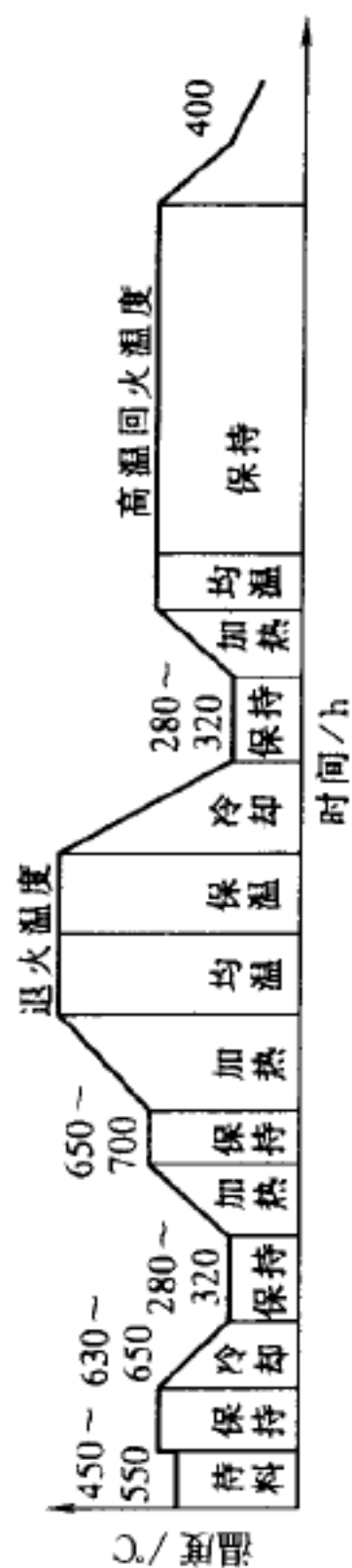
组别	钢号	截面/mm	待料	保持/h	冷却	保持/h	加热/℃·h ⁻¹ ≤	均温/h	保持(h)按钢锭氢含量(10 ⁻⁶)确定					冷却速度/℃·h ⁻¹ ≤		出炉温度/℃ ≤
									≤2.5	3.5	4.5	6	7			
IV	12CrNi2 40CrNi 50CrNi 30Cr2MoV 30Cr1Mo1V 34CrNi1Mo 40CrNiMo	≤300	—	2	停火炉冷	3~5	100	—	6~9	8~12	20~30	35~50	40~60	50	25	300
		301~500	—	3		5~8	80	—	9~15	12~15	30~40	50~90	60~125	40	20	250
		501~700	—	4		8~11	60	—	15~21	15~30	40~115	90~195	125~255	30	15	200
V	S15Cr2Ni2 S17Cr2Ni2Mo 25Cr2NiMoV 18CrMnMoB 20Cr2Mn2Mo 30CrMn2MoB 32Cr2MnMo 32Cr3WMoV 37SiMn2MoV 5CrMnMo 40CrNi2Mo 5CrNiMo 5CrNiW 5SiMnMoV 5CrSiMnMoV 60CrMnMo 60CrMnMo1 50CrNiMo	≤300	—	2	停火炉冷	3~5	80	—	6~9	11~17	25~35	35~55	45~65	40	20	250
		301~500	—	3		5~8	60	—	9~15	17	35~55	55~105	65~130	30	15	200
		—	—	—		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
VI	18Cr2Ni4W 20Cr2Ni4 26Cr2Ni4MoV S30Cr2Ni2Mo 34CrNi3Mo 25CrNi3MoV	≤300	—	3	停火炉冷	3~6	80	—	10~15	25~40	30~50	50~75	60~90	40	20	200
		301~500	—	4		6~9	60	—	15	40~60	50~110	75~155	90~180	30	15	150
		—	—	—		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

图 19-10 锻后热处理工艺曲线(二)起伏等温缓冷工艺



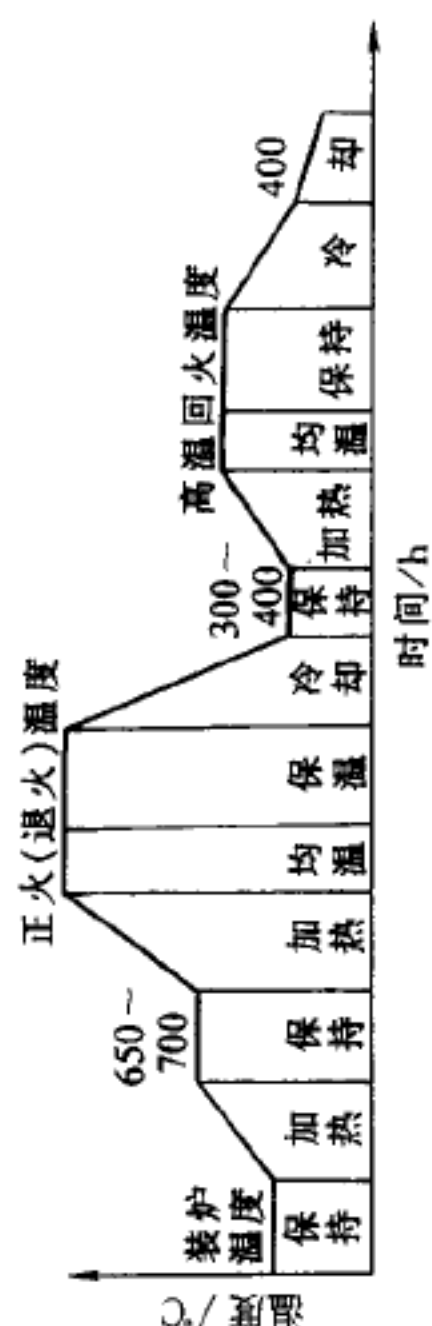
组别	钢号	截面/mm	待料	保持/h	加热/ ℃·h ⁻¹ ≤	均温	保温/h	冷却	保持/h	加热/ ℃·h ⁻¹ ≤	均温	保温(h)按钢锭氢含量(10 ⁻⁶)确定					冷却/ ℃·h ⁻¹ ≤	出炉温度/℃
												≤2.5	3.5	4.5	6	7		
I	15~55	≤300	—	2	功率	—	1~2.5	空冷至 350~400	2	功率	—	4~6	4~6	4~6	10~15	17~26	炉冷	450
		301~500	—	2	功率	—	2.5~4		2~3	100	—	6~10	6~10	6~10	15	26~35	60	400
		501~700	—	3	功率	—	4~5.5		3~4	80	—	10~14	10~14	10~14	15~65	35~110	50	350
		701~1000	—	4	100	—	5.5~8		4~5	70	—	14~20	14~20	14~50	65~225	110~310	50	300
		1001~1300	—	5	80	—	8~10.5		5~7	60	—	20~26	20~26	50~185	225~470	310~615	40	250
II	16Mn~30Mn 20Cr~40Cr 15CrMo~35CrMo 20SiMn~35SiMn 20MnMo 18MnMoNb 20CrMnTi	≤300	—	3	功率	—	1~2.5	空冷至 350~400	2~3	100	—	4~6	4~6	6~10	20~30	25~40	60	400
		301~500	—	3~5	功率	—	2.5~4		3~6	90	—	6~10	6~10	6~10	30~50	40~75	50	350
		501~700	—	5~7	功率	—	4~5.5		6~9	80	—	10~14	10~14	10~45	50~130	75~180	50	300
		701~1000	—	7~10	100	—	5.5~8		9~12	70	—	14~20	14~30	45~185	130~360	180~450	40	250
		1001~1300	—	10~13	80	—	8~10.5		12~15	60	—	20~26	30~160	185~405	360~690	450~845	30	200
III	50Mn 55Cr 1Cr5Mo 12Cr2Mol 20Cr1Mol 34CrMol 42CrMo 50CrMo 12Cr1MoV 17MoV 24CrMoV 35CrMoV 35CrMnMo 40CrMnMo 38CrMoAl 42SiMn 50SiMn 1Cr13 2Cr13 3Cr13	≤300	—	3	功率	—	1~3	空冷至 350~400	2~3	100	—	4~6	4~6	10~16	25~35	30~48	60	350
		301~500	—	3~5	功率	—	3~5		3~6	90	—	6~10	6~10	16	35~60	48~90	50	300
		501~700	—	5~7	100	—	5~7		6~9	80	—	10~14	10~14	16~65	60~155	90~210	50	250
		701~1000	—	7~10	80	—	7~10		9~12	70	—	14~20	14~75	65~230	155~405	210~500	40	200
		1001~1300	—	10~13	70	—	10~13		12~16	60	—	20~26	75~225	230~490	405~770	500~920	30	150
		1301~1500	—	13~15	70	—	13~15		15~18	50	—	26~30	225~360	480~685	770~1080	920~1260	30	120

图 19-11 锻后热处理工艺曲线(三)热装炉正火回火工艺



组别	钢号	截面/mm	待料	保持/h	冷却	保持/h	加热/℃·h ⁻¹ ≤	保持/h	均温	加热/℃·h ⁻¹ ≤	保温/h	冷却	保温(h)按钢锭氢含量(10 ⁻⁶)确定					冷却/℃·h ⁻¹ ≤	出炉温度/℃
													≤2.5	3.5	4.5	6	7		
IV	12CrNi2 40CrNi	≤300	—	2	停火炉冷至400℃封炉冷	3~5	功率	2	—	功率	1~3	停火炉冷至400℃封炉冷	—	4~6	12~18	24~36	32~48	40	200
	50CrNi 30Cr2MoV	301~500	—	2~3		5~7	80	3	—	100	3~5		6~10	6~10	18	36~65	48~100	30	180
	30Cr1Mo1V	501~700	—	3~5		7~9	70	4	—	80	5~7		10~14	10~14	18~70	65~160	100~215	30	150
	34CrNi1Mo	701~1050	—	5~7		9~12	60	6	—	70	7~10		14~21	14~110	70~280	160~475	215~580	20	120
V	S15Cr2Ni2	≤300	—	2	停火炉冷至400℃封炉冷	4~6	功率	3	—	功率	1~3	停火炉冷至400℃封炉冷	—	4~6	16~25	30~45	36~55	40	200
	S17Cr2Ni2Mo	301~500	—	2~3		6~8	80	4	—	100	3~5		6~10	6~10	25~30	45~80	55~105	30	180
	25Cr2Ni2MoV	501~700	—	3~5		8~10	70	5	—	80	5~7		10~14	10~20	30~100	80~190	105~245	30	150
	40CrNi2Mo	701~1050	—	5~7		10~13	60	7	—	70	7~10		14~21	20~165	100~330	190~530	245~635	20	120
VI	18Cr2Ni4W	≤300	—	2	停火炉冷至400℃封炉冷	4~6	功率	3	—	功率	1~3	停火炉冷至400℃封炉冷	—	4~6	25~35	40~65	50~75	40	200
	20Cr2Ni4	301~500	—	2~3		6~8	80	4	—	100	3~5		6~10	30~40	35~85	65~130	75~160	30	150
	26Cr2Ni4MoV	501~700	—	3~5		8~10	70	5	—	80	5~7		10~14	40~115	85~200	130~290	160~330	30	120
	S30Cr2Ni2Mo	701~1050	—	5~7		10~13	60	7	—	70	7~10		14~21	115~370	200~540	290~735	330~840	20	100

图 19-12 锻后热处理工艺曲线(四)热装炉退火回火工艺



组别	钢号	截面/mm	装炉温度/℃ ≤	保持	加热/℃·h ⁻¹ ≤	保持	加热/℃·h ⁻¹ ≤	均温	保温	冷却	保持	加热/℃·h ⁻¹ ≤	均温	保温	冷却/℃·h ⁻¹ ≤	出炉温度/℃ ≤
I	15~55 20Cr~40Cr 15CrMo~42CrMo 34CrMo1A 20MnMo 18MnMoNb 20MnSi~42SiMn 20CrMnTi 35CrMnMo 12Cr1MoV 17MoV 24CrMoV 35CrMoV 38CrMoAl 12CrNi2	≤300	850	—	—	—	—	—	1~2	空冷至表面 250~300℃ 或停火炉冷至 300~350℃	1	100	—	2~5	空冷	—
		301~500	650	—	—	1~2	功率	2~4	2		80	—	6~10	60	—	400
		501~700	550	1~2	70	2~4	100	4~6	3		80	—	10~14	50	30	350
		701~1000	450	2~3	60	4~6	80	6~9	4		60	—	14~20	40	20	300
		1001~1300	300	3~4	50	6~8	60	9~12	5		60	—	20~26	30	15	250
II	50Mn 55Cr 1Cr5Mo 12Cr2Mo1 20Cr1Mo1 50CrMo 40CrMnMo 50SiMn 40CrNi 50CrNi 30Cr2MoV 30Cr1Mo1V 34CrNi1Mo 40CrNiMo 25Cr2NiMoV 40CrNi2Mo 18CrMnMoB 20Cr2Mn2Mo 30CrMn2MoB 32Cr2MnMo 32Cr3WMoV 37SiMn2MoV 5CrMnMo 5CrNiMo 5CrNiW 5SiMnMoV 5CrSiMnMoV 60CrMnMo 60CrMnMo1 50CrNiMo 18Cr2Ni4W 20Cr2Ni4 26Cr2Ni4MoV S15Cr2Ni2 S17Cr2Ni2Mo S30Cr2Ni2Mo 25CrNi3MoV 34CrNi3Mo	≤300	600	1	60	1~2	功率	—	1~3	空冷至表面 250~300℃ 或停火炉冷至 300~350℃	2	80	—	3~8	—	400
		301~500	500	1~2	50	2~3	100	3~5	3		80	—	8~13	50	30	350
		501~700	400	2~3	40	3~5	80	5~7	4		60	—	13~18	40	20	300
		701~1000	300	3~4	40	5~7	60	7~10	5		50	—	18~25	30	15	250
		1001~1300	250	4~5	30	7~9	60	10~13	6		50	—	25~33	20	10	200

图 19-13 锻后热处理工艺曲线(五)冷装炉正火回火工艺

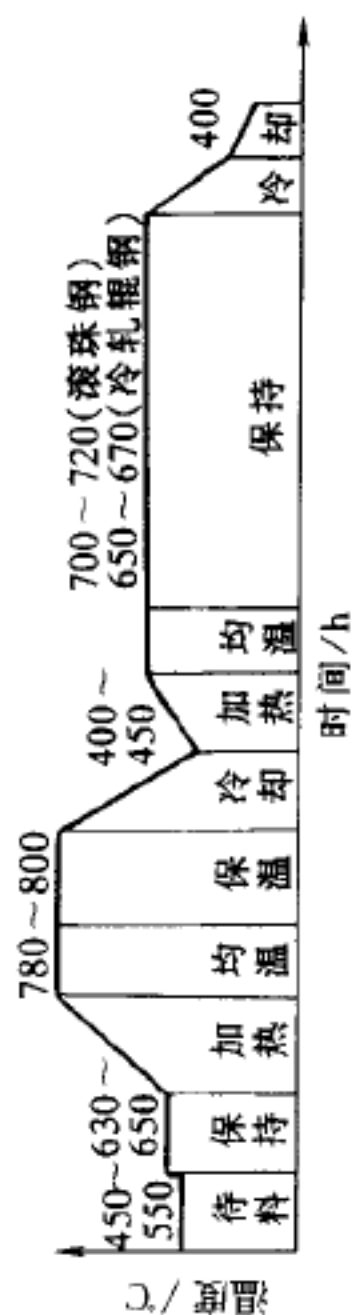


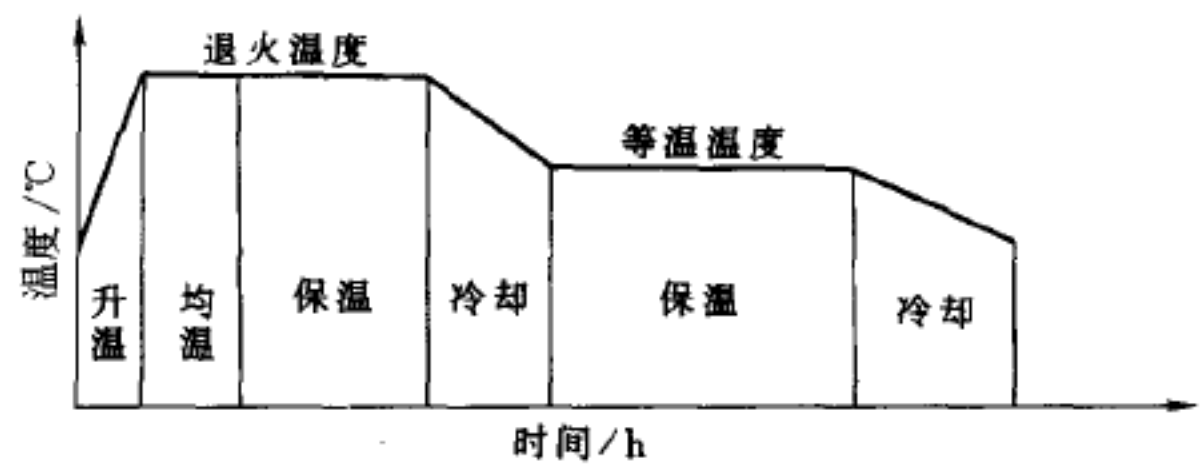
图 19-14 锻后热处理工艺曲线(六)滚珠轴承钢、冷轧辊钢热装炉球化退火工艺

钢 号	截面 /mm	待料	保持 /h	加热/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ \leq	均温	保温 /h	冷却	加热/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ \leq	均温	保温(h)按钢锭氢含量(10^{-6})确定					冷却 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ \leq	出炉温度 $^{\circ}\text{C}$ \leq
										≤ 2.5	3.5	4.5	6	7		
9Cr2 9CrV 9Cr2Mo 9Cr2W GCr15 GCr15SiMn	200 ~ 400	—	4 ~ 6	90	—	3 ~ 6	停 火 炉 冷	80	—	4 ~ 8	4 ~ 8	4 ~ 15		40	20	200
	401 ~ 600	—	6 ~ 8	80	—	6 ~ 9		70	—	8 ~ 12	8 ~ 12	15 ~ 100		30	20	150
	601 ~ 800	—	8 ~ 10	70	—	9 ~ 12		60	—	12 ~ 16	12 ~ 25	100 ~ 230		20	15	120
	801 ~ 1000	—	10 ~ 12	60	—	12 ~ 15		50	—	16 ~ 20	25 ~ 100	230 ~ 420		20	15	120



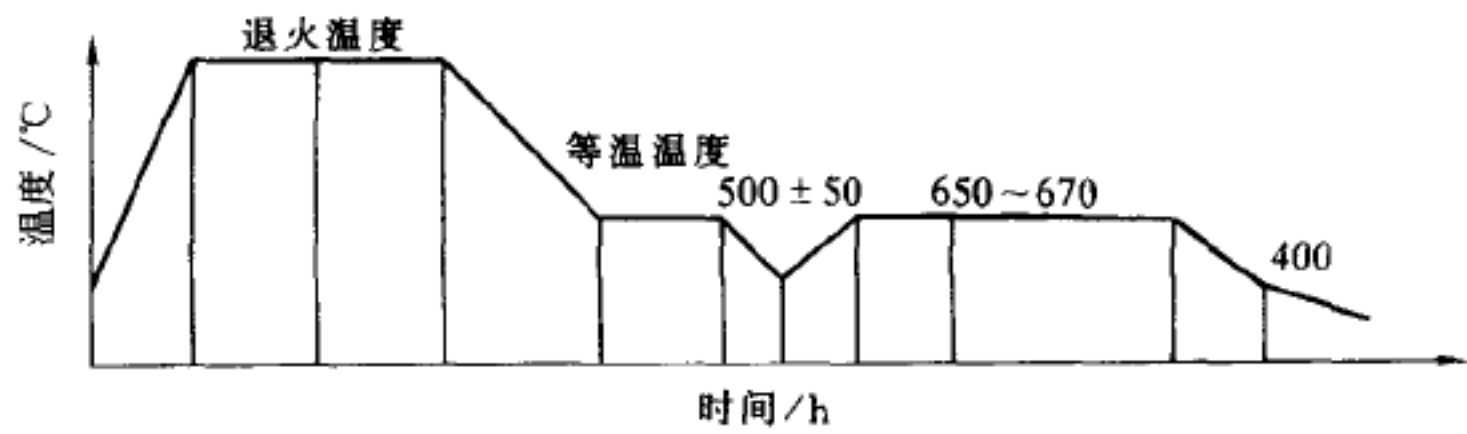
图 19-15 锻后热处理工艺曲线(七) 4Cr5MoV1Si、3Cr2W8V 热装炉球化退火工艺

钢 号	截面 /mm	待 料	保 持 /h	冷 却	保 持 /h	加 热/ ℃·h ⁻¹ ≤	保 持 /h	加 热/ ℃·h ⁻¹ ≤	均 温	保 温 /h	冷 却	保 持 /h	保温(h)按钢锭氢含量(10 ⁻⁶)确定					冷 却/ ℃·h ⁻¹ ≤	出 炉 温 度/℃ ≤		
													≤2.5	3.5	4.5	6	7				
4Cr5MoV1Si 3Cr2W8V	200 ~ 400	—	2 ~ 4	停火 炉冷	3 ~ 5	80	3	100	—	3 ~ 6	停	5 ~ 9	—	5 ~ 10	5 ~ 10	5 ~ 25	5 ~ 55	5 ~ 75	40	20	200
	401 ~ 600	—	4 ~ 5	至 450℃	5 ~ 7	70	4	80	—	6 ~ 9	火 炉	9 ~ 13	—	10 ~ 15	10 ~ 60	25 ~ 120	55 ~ 185	75 ~ 220	30	20	150
	601 ~ 800	—	5 ~ 6	封炉 冷	7 ~ 10	60	5	70	—	9 ~ 12	冷	13 ~ 18	—	15 ~ 20	60 ~ 165	120 ~ 265	185 ~ 375	220 ~ 435	20	15	120



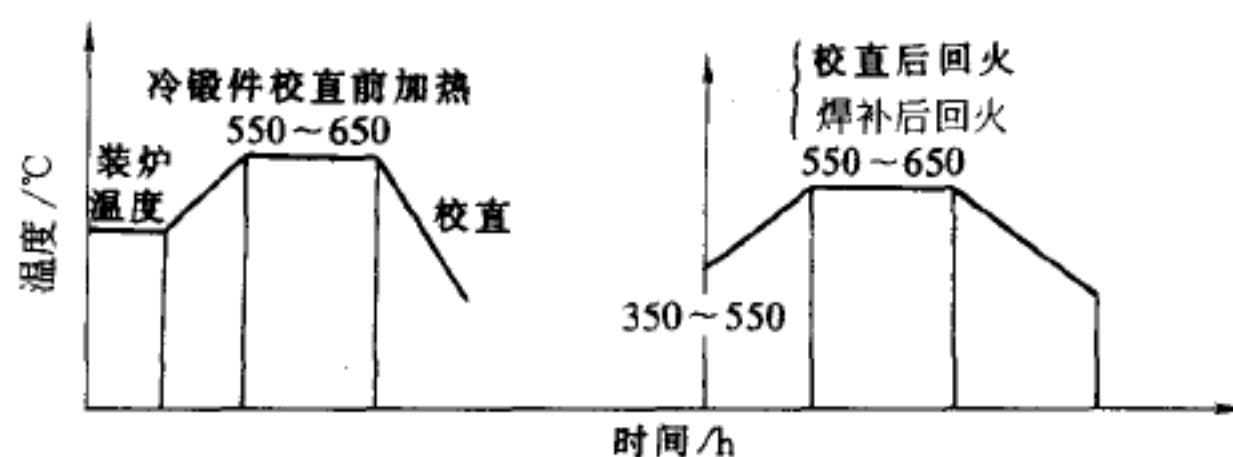
钢 号	装炉/℃	升温	均温	保温/h	冷却	保温/h	冷却/ ℃·h ⁻¹	出炉温度 /℃
T7, T8 T10, T12	500 ~ 600	按功率	—	750 ~ 770℃ 1.5 ~ 3.5	炉冷	660 ~ 680℃ 2 ~ 4	≤ 60	500 ~ 550
W9Cr4V W18Cr4V Cr12MoV, Cr6WV	500 ~ 600	按功率	—	830 ~ 850℃ 1.5 ~ 3.5	炉冷	720 ~ 750℃ 4 ~ 6	≤ 40 ~ 50	500 ~ 550
9CrSi 4CrW2Si 6CrW2Si	500 ~ 600	按功率	—	790 ~ 810℃ 1.5 ~ 3.5	炉冷	700 ~ 720℃ 3 ~ 5	≤ 40 ~ 50	500 ~ 550
GCr15, CrMn, GCr15SiMn, CrWMn	500 ~ 600	按功率	—	770 ~ 790℃ 1.5 ~ 3.5	炉冷	600 ~ 700℃ 3 ~ 5	≤ 40 ~ 50	500 ~ 550

图 19-16 锻后热处理工艺曲线(八)工具钢冷装炉球化退火工艺



钢 号	装炉温度 /℃	升温	均温	保温/h	冷却/ ℃·h ⁻¹	保温/h	冷却	升温	均温	保温/h	冷却/ ℃·h ⁻¹	冷却/ ℃·h ⁻¹	出炉温度 /℃
T7, T8 T10, T12	500 ~ 600	按功率	—	750 ~ 770℃ 1.5 ~ 3.5	炉冷	660 ~ 680℃ 2 ~ 4	炉冷	按功率	—	按 5 ~ 6h/ 100mm 计算	≤ 30	≤ 15	200
5CrW2Si 6CrW2Si	500 ~ 600	按功率	—	790 ~ 810℃ 1.5 ~ 3.5	炉冷	700 ~ 720℃ 3 ~ 5	炉冷	按功率	—	按 8 ~ 10h/ 100mm 计算	≤ 30	≤ 15	200
GCr15 GCr15SiMn	500 ~ 600	按功率	—	770 ~ 790℃ 1.5 ~ 3.5	炉冷	680 ~ 700℃ 3 ~ 5	炉冷	按功率	—	按 10 ~ 15h /100mm 计算	≤ 30	≤ 15	200
3Cr2W8V	500 ~ 600	按功率	—	900 ~ 910℃ 1.5 ~ 3.5	炉冷	730 ~ 750℃ 3 ~ 5	炉冷	按功率	—	按 10 ~ 15h /100mm 计算	≤ 30	≤ 15	200

图 19-17 锻后热处理工艺曲线(九)工具钢冷装炉退火及扩散去氢工艺



钢 号	截面 /mm	装炉温度 /°C ≤	保持 /h	加热/°C ·h ⁻¹ ≤	保温 /h	终校温度 /°C >	加热/°C ·h ⁻¹ ≤	保温 /h	冷却	出炉温度 /°C ≤
1. 碳钢 15~55 2. 合金结构钢碳含量 ≤ 0.5% 并合金含量 ≤ 2%	≤ 350	550	—	—	6~8	350	—	7~9	空冷	—
	351~500	550	—	—	8~11	350	—	9~12	炉冷	400
	501~800	550	—	—	11~13	350	—	12~16	炉冷	350
	801~1000	450	1~2	60	13~15	350	—	16~20	炉冷	300
	1001~1300	300	2~3	50	15~20	350	—	20~25	炉冷	250
其余合金钢	≤ 350	550	—	—	6~8	400	—	7~9	炉冷	400
	351~500	500	1	50	8~11	400	50	9~12	炉冷	350
	501~800	400	1~2	40	11~13	400	40	12~16	炉冷	300
	801~1000	300	2~3	40	13~15	400	40	16~20	炉冷	250
	1001~1300	200	3~4	30	15~20	400	30	20~25	炉冷	200

图 19-18 大型锻件校直前加热和校直、补焊后回火工艺

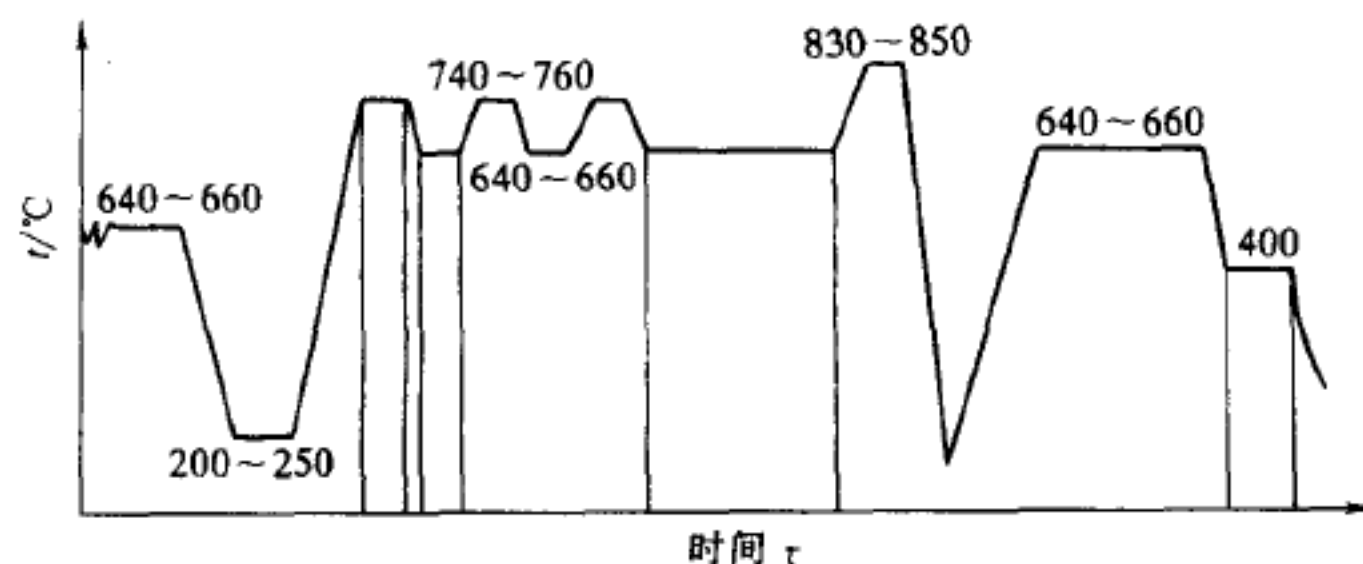
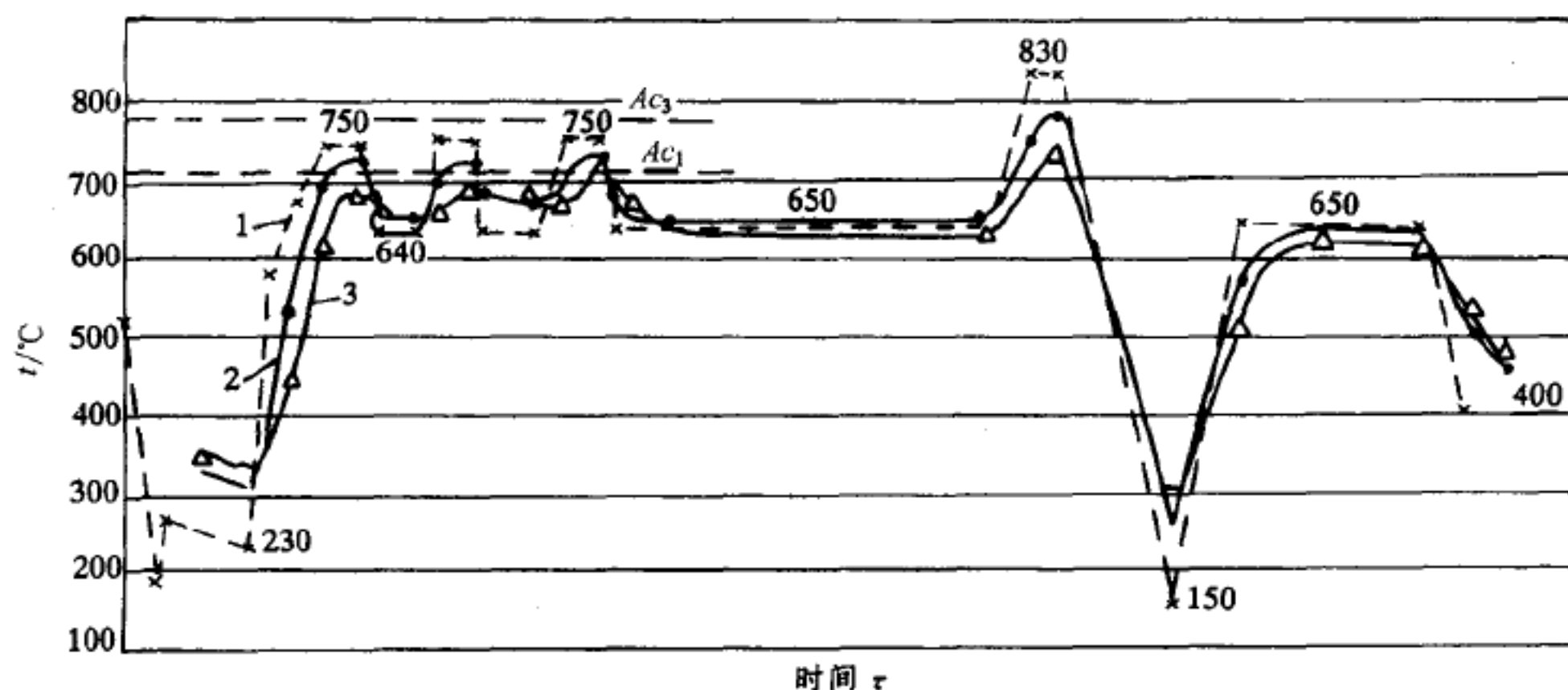


图 19-19 38CrNi3MoVA 钢大锻件的循环加热和快速终冷锻后热处理工艺曲线(处理过程持续时间 170~242h)

图 19-20 38CrNi3MoVA 钢大锻件在按图 19-19 工艺进行锻后热处理时工件表面和心部的温度变化情况
1—炉温 2—工件表面温度 3—工件心部温度

2) 最终热处理(第二热处理)(表 19-4 ~ 表 19-9, 图 19-21)

表 19-4 大锻件用钢的正火、淬火加热温度

钢 号	加热温度/℃		钢 号	加热温度/℃	
	正火	淬火		正火	淬火
Q235	900 ~ 920	840 ~ 860	35CrMnMo	860 ~ 880	850 ~ 870
15	渗碳 900 ~ 940	780 ~ 800	40CrMnMo	860 ~ 880	850 ~ 870
	正火 900 ~ 920		60CrMnMo	840 ~ 860	830 ~ 850
20	渗碳 900 ~ 940	780 ~ 800	20Cr2Mn2MoA		870 ~ 890
	正火 880 ~ 900				800 ~ 820
25	870 ~ 890	850 ~ 880	32Cr2MnMo	880 ~ 900	870 ~ 890
35	860 ~ 880	850 ~ 870	35SiMnMo	880 ~ 900	870 ~ 890
40	840 ~ 860	830 ~ 850	42SiMnMo	860 ~ 880	850 ~ 870
45	840 ~ 860	830 ~ 850	60SiMnMo	840 ~ 860	830 ~ 850
50	820 ~ 840	810 ~ 830	55Si2MnV	860 ~ 880	850 ~ 870
55	810 ~ 830	800 ~ 830	24CrMoV	880 ~ 900	870 ~ 890
60	800 ~ 820	780 ~ 810	30CrMoV9		850 ~ 870
50Mn	820 ~ 840	800 ~ 820	35CrMoV		890 ~ 910
60Mn	820 ~ 840	800 ~ 820	60CrMoV	850 ~ 870	840 ~ 860
65Mn	820 ~ 840	800 ~ 820	30Cr2MoV	940 ~ 950	940 ~ 950
35Mn2	840 ~ 860	800 ~ 850	42MnMoV	870 ~ 890	860 ~ 880
45Mn2	830 ~ 850	810 ~ 840	38CrMnNi	860 ~ 880	850 ~ 870
50Mn2	820 ~ 840	810 ~ 840	24CrMnN	880 ~ 900	870 ~ 890
	渗碳 900 ~ 940		34Mn2MoB	850 ~ 870	840 ~ 860
20Cr	正火 880 ~ 900	780 ~ 820	35CrNiW	860 ~ 880	850 ~ 870
40Cr	850 ~ 870	840 ~ 860	18MnMoNb	940 ~ 950	910 ~ 930
55Cr	820 ~ 840	820 ~ 840	34CrNiMo	860 ~ 880	850 ~ 870
15CrMo	900 ~ 920	890 ~ 910	34CrNi2Mo	860 ~ 880	850 ~ 870
20CrMo	890 ~ 910	880 ~ 900	30Cr2Ni2Mo		860 ~ 880
30CrMo	870 ~ 890	860 ~ 880	34CrNi3Mo	860 ~ 880	850 ~ 870
34CrMo	860 ~ 880	850 ~ 870	30Cr2Ni3Mo		860 ~ 880
34CrMo1A	860 ~ 880	850 ~ 870	12CrNi3A	渗碳 900 ~ 930	780 ~ 800
42CrMo	850 ~ 870	840 ~ 860		正火 880 ~ 900	
20Cr2Mo(20CrMo9)		930 ~ 950			870 ~ 890
20Cr3Mo(20CrMo10)		920 ~ 940	20Cr2Ni4A	退火 760 ~ 780	800 ~ 820
20MnMo	900 ~ 920	890 ~ 910	18CrNiWA	900 ~ 920	890 ~ 910
20SiMn	910 ~ 930	880 ~ 900	20CrMnTi	渗碳 900 ~ 930	800 ~ 870
35SiMn	880 ~ 900	860 ~ 880	18CrMnMoB	880 ~ 900	870 ~ 890
42SiMn	860 ~ 880	840 ~ 860	30CrMn2MoB	880 ~ 900	870 ~ 890
50SiMn	840 ~ 860	820 ~ 840	45CrNiMoV		850 ~ 870
55Si2Mn	860 ~ 880	860 ~ 880	42SiMnMoV	870 ~ 890	860 ~ 880
60Si2MnA	860 ~ 880	850 ~ 870	37SiMn2MoV	880 ~ 900	850 ~ 870
70Si3MnA		850 ~ 870	32MnMoVB	860 ~ 880	850 ~ 870
17MoV		940 ~ 960	34Cr3WMoV		950 ~ 960
40CrV	850 ~ 870	840 ~ 860	50SiMnMoB		840 ~ 860
45CrV	850 ~ 870	840 ~ 860	14CrMnMoVB		890 ~ 910
40CrNi		840 ~ 860	37SiMnMoWV	880 ~ 900	850 ~ 870
45CrNi		830 ~ 850	T7, T7A	800 ~ 820	800 ~ 830
60CrNi	830 ~ 860		T8, T8A	760 ~ 780	800 ~ 820
30CrMnSi	870 ~ 890	860 ~ 880	T10, T10A	800 ~ 850	780 ~ 800
35CrMnSi	860 ~ 880	850 ~ 870	T12, T12A	850 ~ 870	780 ~ 800

(续)

钢 号	加热温度/℃		钢 号	加热温度/℃	
	正火	淬火		正火	淬火
3Cr2W8	900 ~ 920	1040 ~ 1060	5CrSiMnMoV	910 ~ 930	850 ~ 870
3Cr2W8V		1040 ~ 1060	GCr15		820 ~ 860
4CrWMo		850 ~ 870	GCr15SiMn		820 ~ 840
5CrMoV		840 ~ 860	9Cr2		840 ~ 870
5SiMn2W		860 ~ 890	9Cr2W		860 ~ 880
4SiMnMoV		900 ~ 920	9SiCr		840 ~ 860
4CrW2Si		910 ~ 930	0Cr13		1000 ~ 1050
6CrW2Si		850 ~ 900	1Cr13		1000 ~ 1050
5CrMnMo		830 ~ 860	2Cr13		980 ~ 1000
5CrNiMo		840 ~ 860	3Cr13		1000 ~ 1050
5CrNiW	840 ~ 880	830 ~ 860	4Cr13		1000 ~ 1050
Cr12MoV	退火 760 ~ 790	1020 ~ 1040	1Cr18Ni9Ti	退火 750 ~ 800	1100 ~ 1150
		1130 ~ 1150	Cr17		
4Cr4W8MoV	退火 850 ~ 870	1040 ~ 1060	Cr17Ni2	退火 650 ~ 670	950 ~ 980
			Cr5Mo		1000 ~ 1050

表 19-5 大锻件淬火冷却时间

冷 却		截面/mm															
		≤ 100		101 ~ 250		251 ~ 400		401 ~ 600		601 ~ 800		801 ~ 1000					
油冷	冷却剂	油		油		油		油		油		油					
	冷却时间/min	20		20 ~ 50		45 ~ 80		70 ~ 120		110 ~ 160		150 ~ 220					
水淬 油冷	冷却剂	水	油	水	油	水	油	水	油								
	冷却时间/min	1 ~ 2	~ 15	1 ~ 3	15 ~ 30	2 ~ 5	25 ~ 60	3 ~ 6	50 ~ 100								
水冷	冷却剂	水		水		水											
	冷却时间/min	1 ~ 3		3 ~ 10		10 ~ 16											
间隙冷	冷却剂			水	空	水	水	空	水			油	空	油	油	空	油
	冷却时间/min			1 ~ 3	2 ~ 3	3 ~ 6	4 ~ 8	3 ~ 5	6 ~ 8			80 ~ 100	5 ~ 10	30 ~ 60	100 ~ 140	10 ~ 15	50 ~ 80

表 19-6 回火温度与表面硬度的关系

钢 号	硬度 HBW											
	160 ~ 220	180 ~ 220	197 ~ 241	217 ~ 255	229 ~ 269	241 ~ 285	269 ~ 302	280 ~ 320	320 ~ 340	50 ~ 70 HS	60 ~ 80 HS	≥ 75 HS
	回火温度/℃											
35	640	570	510 ^①	530 ~ 560 ^① 590	530 ^① 570	510 ^①						
45		590	550 ~ 590 ^①									
55												
65Mn												

(续)

钢 号	硬度 HBW											
	160 ~ 220	180 ~ 220	197 ~ 241	217 ~ 255	229 ~ 269	241 ~ 285	269 ~ 302	280 ~ 320	320 ~ 340	50 ~ 70 HS	60 ~ 80 HS	≥ 75 HS
	回火温度/℃											
40Cr			590	560 ~ 610 ^①	530 ~ 590 ^①	510 ~ 560 ^①	540 ^①					
55Cr					600	570						
35SiMn				580								
20CrMo	066											
20CrMo9		650										
34CrMo1		670	640	620	590	550 ~ 620 ^①	520					
35CrMo		660	610	580	560	530 ~ 580 ^①	560 ^①					
24CrMo10		680										
40CrNi		660	570									
35CrMnMo				610	580							
40CrMnMo				620	600	570						
60CrMnMo			650 ^③		630			570				
32Cr2MnMo						610	590	580				
30CrMnSi				610	580							
34CrNiMo				630								
34CrNi2Mo					620							
34CrNi3Mo				630 ^④	620	590	560	550	530			
30Cr2Ni2Mo				640		590 ~ 620 ^②	600 ^②	560				
30Cr2Ni3Mo					640 ^②							
24CrMoV						660						
35CrMoV					590	560						
30CrMoV9						620						
30Cr2MoV				690 ^④		680						
35CrNiW				630	600	580 ~ 630 ^①						
18MnMoNb					610							
18CrMnMoB						580						
30CrMn2MoB							580					
50SiMnMoB					630							
9Cr2								640				320 ^①
9CrV							590 ^③	560 ^③			350 ^①	
9Cr2W				690							350 ^①	
9Cr2Mo										390		320
5CrMnMo						640		560				
5CrNiMo						570					460	
6CrW2Si					670							
2Cr13					630	600						
3Cr13			670 ^③			600 ^③						
Cr5Mo		640										

注:1. 回火温度误差为 ±10℃。

2. 淬火、正火冷却方式:①水淬油冷;②水淬;③空冷;④鼓风冷却。

3. 无标注者为油冷。

表 19-7 根据屈服点选择回火温度参考表

$\sigma_s \geq / \text{MPa}$	温度/°C									
	510	520	530	540	550	560	570	580	590	
	钢 号									
250						20MnMo ^③ 35·750 ^③		45·800 ^③		20MnSi ^③
300							35 20MnMo35·250	40·300		
350						35 ^① 40·150 ^①		20MnMo ^① 40Cr·500	45	45·150
400					40Cr·300	20MnMo ^① 35CrMo·500		40Cr·200		15CrMo
450			40Cr·300	45CrNi·150	35CrMo·250	40·60 ^②		20CrMo ^① 35CrMo·150	45CrV50SiMn 35CrMo·450 ^①	
500					35CrMo·400 ^① 35CrMo·150	20CrMo ^① 34CrMo1·700	40Cr 35CrMo·300	40Cr·200 ^①	35CrMo 34CrMo1·500	
温度/°C										
$\sigma_s \geq / \text{MPa}$	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690
	钢 号									
250	35 15CrMo·60 ^③	40 15CrMo ^③		45 ^③						
300	40 35·300 ^①	45·500		45	35CrMo 650 ^③					
350		40·60 ^①	15CrMo		35CrMo 35CrMo·450			34CrMo1 34CrMo1·250		
400	50Mn2 35CrMo·150	34CrMo1 ^③	42CrMo·400	40Cr	20CrMo ^①	34CrMo1 34CrMo1·250				
450	40Cr 35CrMnMo ·800	35CrMo	18MnMoNb 34CrNi2Mo·400 ^③	34CrMo1 34CrMo1·400	32Cr2MnMo ·1300	20CrMo9		24CrMo10	2Cr13	30Cr2MoV ^④ 30Cr2MoV ·650 ^④
500	18MnMoNb 35CrMnMo ·500	34CrMo1	Cr13 34CrNi1Mo 34CrNi1Mo·200 34Mn2MoB·350	35CrMo ^① 34CrNi3Mo ·400 ^①	Cr5MoV 35SiMnMo	24CrMo10				

(续)

$\sigma_s \geq / \text{MPa}$	温度/℃									
	510	520	530	540	550	560	570	580	590	
	钢 号									
550		20CrMo ^① 45CrNi·150 ^① 40Cr·70	40Cr	45CrNi	55·150	35CrMo	18MnMoNb 40Cr·150 ^①	34CrMo1 34CrMo·250 ^①	34CrMo1·150 ^① 34CrNiMo·300 18CrMnMoB·350 32Cr2MnMo·650	
600	40Cr·30		45CrNi		35CrMo	18MnMoNb 40Cr·100 ^①	34CrMo1 42CrMo 35CrMo·100 ^①	34CrMo1·100 18CrMnMoB ·400 ^①	34CrNiW·250 32Cr2MnMo·400	
650	45CrNi			42CrMo 40Cr·30 ^①	40Cr ^① 34CrMo1	35CrMo·140 ^①	35CrMo ^① 34CrMo1·150 ^① 18CrMnMoB·400	34CrNiMo·300 35CrMnMo·400	35CrMo·50 ^① 32Cr2MnMo·300	
700	42CrMo			34CrMo1 ·200 ^①	35CrMo·100 ^①	34CrNiMo ·300	30CrMn2MoB ·350	5CrMnMo 18CrMnMoB·350		
	温度/℃									
$\sigma_s \geq / \text{MPa}$	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690
	钢 号									
550	42CrMo 55Cr·400 40CrNiMo ·600	34CrMo1·150 35CrMnMo ·500 32Cr2MnMo ·750	40Cr ^① 32Cr2MnMo·600 50SiMnMoB·250 ^①	2Cr13 40CrV·200 ^① 35CrNiW ·250 ^①	35CrMnMo 50SiMnB ·250 ^①	30CrMn 2MnB·200				24CrMoV
600	40Cr ^① 34CrNiMo ·250 35CrMnMo ·300	40CrV ^① 1Cr13 40CrV·150 ^① 32Cr2MnMo ·350	35CrNiW 35CrNiW·350 34CrNi3Mo·550 50SiMnMoB·650	45CrV ^①	14CrMnMoVB	34CrNiMo		24CrMoV		30Cr2MoV
650	5CrMnMo 32Cr2MnMo ·300 30CrMn2MoB ·500	(30Cr2Ni3Mo) ·200 ^②		32Cr2MnMo			34Cr3WMoV			
700	34CrNi3Mo (30Cr2Ni2Mo) ·170 ^②	32Cr2MnMo 32Cr2MnMo ·220						30Cr2MoV		

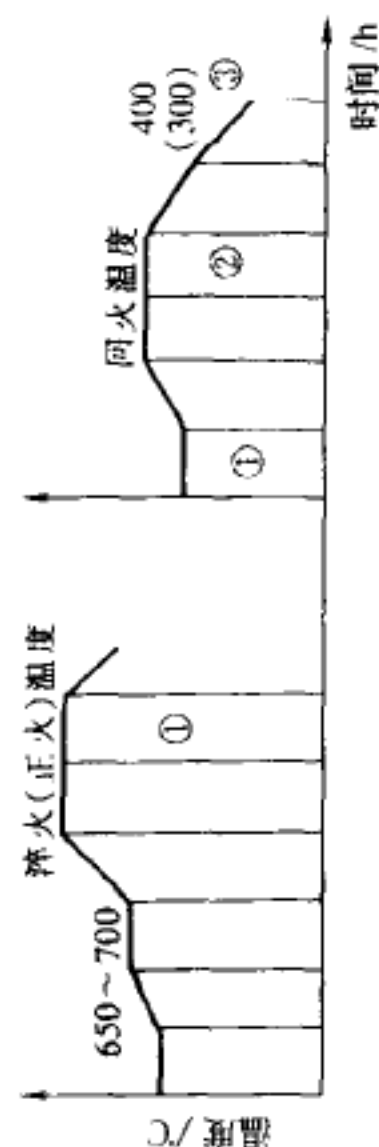
(续)

$\sigma_s \geq / \text{MPa}$	温度/℃									
	510	520	530	540	550	560	570	580	590	
	钢 号									
750			25CrNi4·30		18CrMnMoB 18CrMnMoB·400	30CrMn2 MoB·150	45CrNi ^① 18CrNiW·300	34CrNi3Mo 34CrNi3Mo·200	32Cr2MnMo·200 34Cr2Ni2Mo·250	
800						34CrNi3Mo		34CrNi3Mo·200	34CrNi3MoV	
850				34CrNi3Mo	45CrNi ^① 18CrNiW·300	34CrNi3Mo·300 ^①	34CrNiMo·60			
900		34CrNi3Mo			34CrNi3Mo·300 ^① 18CrNiW·200	34CrNiMo·60				
	温度/℃									
$\sigma_s \geq / \text{MPa}$	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690
	钢 号									
750				34Cr3WMoV ·400	34Cr3WMoV					
800		45CrNiMoV				30Cr2MoV				
850			34Cr3WMoV							
900		34Cr3WMoV	34CrNi3Mo·70							

注:1. 钢号后有数字者,表示是纵向性能,其数字为截面尺寸(mm),有括号者为横向性能,只写钢号者为切向性能。

2. 淬火、正火冷却方式:①水淬油冷;②水淬;③空冷;④鼓风冷却。

3. 无标明者为油冷。

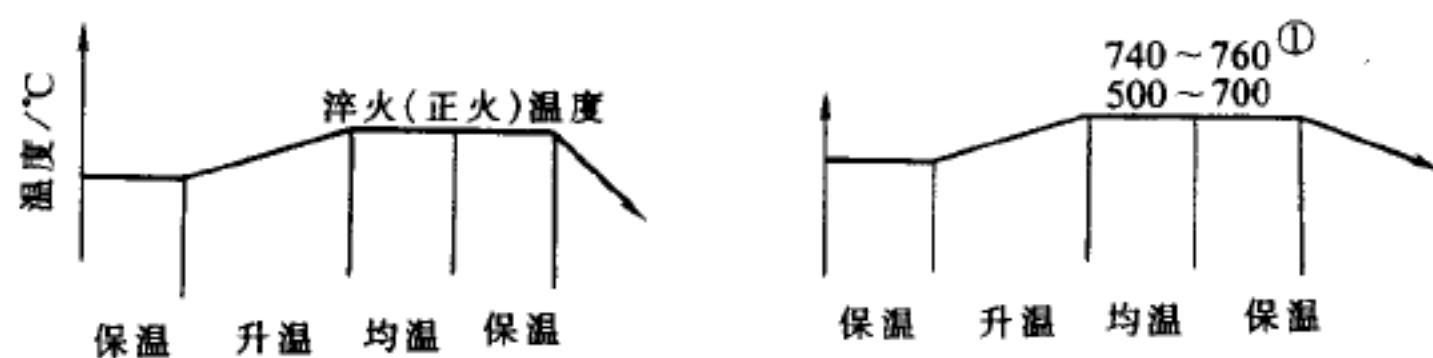


组别	钢号	截面/mm	装炉温度/°C	升温 ≤/°C ·h ⁻¹	保温/h	均温/h	保温/h	冷却	装炉温度/°C	升温 ≤/°C ·h ⁻¹	保温/h	均温/h	保温/h	冷却 ≤/°C ·h ⁻¹	出炉温度/°C
I	含 $w_C < 0.45\%$ 的碳素钢 20Cr ~ 40Cr, 20MnMo, 20MnSi 15CrMo ~ 35CrMo, 17MoV 35SiMn, 34CrMo1A, 20Cr2Mo 24Cr3Mo	≤100	加热温度	—	—	目测	—	空冷	350 ~ 400	—	—	目测	1.5 ~ 2 /100 mm, 但 不小于 4	空冷	—
		101 ~ 250													
		251 ~ 400													
		401 ~ 600			3 ~ 4										
		601 ~ 800			4 ~ 5										
II	50, 55, 50Mn2, 55Cr 65Mn, 60Si2Mn, 60Si2MnA 40CrNi ~ 60CrNi 42CrMo	≤100	加热温度	—	—	目测	0.6 ~ 0.8/ 100mm	空冷 或按表 16, 5 冷却	350 ~ 400	—	—	目测	—	空冷	—
		101 ~ 250													
		251 ~ 400			2 ~ 3										
		401 ~ 600			3 ~ 4										
		601 ~ 800			4 ~ 5										
III	20CrMoV, 15MnMoNb 18CrMnMoB, 35CrNiW 34CrNiMo ~ 34CrNi3Mo 32Cr2MnMo, 35SiMnMo 42SiMnMo, 37SiMn2MoV 37SiMnMoWV, 42SiMnMoV 34Mn9MoB, 42MnMoV 35CrMoV, 50SiMnMoB	≤100	加热温度	—	—	目测	0.8 ~ 1/100 mm	空冷 或按表 16, 5 冷却	250 ~ 350	—	—	目测	1.0 ~ 2.5/ 100 mm, 但 不小于 4	空冷	—
		101 ~ 250													
		251 ~ 400			2 ~ 3										
		401 ~ 600			3 ~ 4										
		601 ~ 800			4 ~ 5										
IV	4CrWMo, 5CrWV, 5CrNiMo 5CrMnMo, 18CrNiW 4Cr5MoV1Si, 6CrW2Si 5SiMnMoV, 8Cr3	≤100	400 ~ 450	50	1	目测	—	空冷	250 ~ 350	—	—	目测	—	空冷	—
		101 ~ 250			1 ~ 2										
		251 ~ 400			1 ~ 2										
		401 ~ 600			2 ~ 3										
		601 ~ 800			3 ~ 4										

① 对截面很小的工件, 保温时间可增长至 1.3 ~ 1.5 倍; ② 小截面工件或在较低温度回火时, 保温时间可增长至 1.3 ~ 1.5 倍; ③ 出炉温度上限适用于变形倾向小的一般工件, 变形倾向大或重要锻件出炉温度采用下限; 18CrNiW 在过冷温度下的保温时间为规定的 1.5 倍。

图 19-21 锻件第二热处理工艺规范(适用于煤气加热炉)

表 19-8 1Cr13、2Cr13、3Cr13、Cr5Mo 锻件热处理工艺规范



截面 /mm	装炉 温度 /°C	保温 /h	升温 ≤/°C ·h ⁻¹	均温 /h	保温 /h	冷 却	装炉 温度 /°C	保温 /h	升温 ≤/°C ·h ⁻¹	均温 /h	保温 /h	冷 却
≤50	550~650	0.5	—	目 测	0.75	按表 19-5 或空冷	350~400	1	100	目 测	1~2	空冷
51~100	400~500	1.0	—		1.0		300~350	1	100		3~4	油冷
101~150	350~450	1.5	—		1.5		300~350	1.5	100		4~6	油冷
151~1300 ^②	350~450	2~3	80		2~3	空冷	300~350	2~3	60		6~10	炉冷至 250°C 出炉

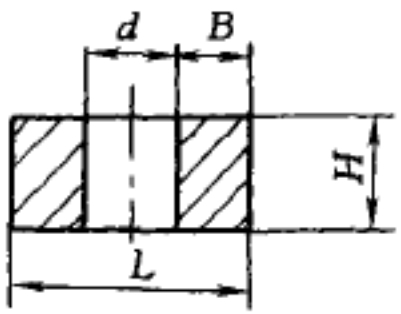
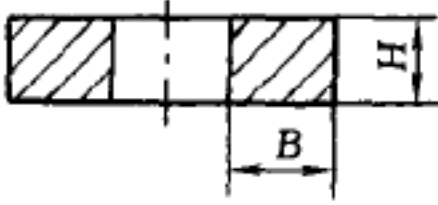
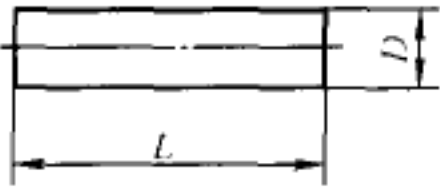
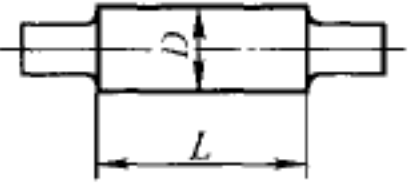
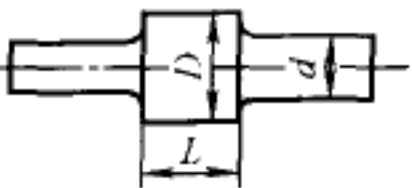
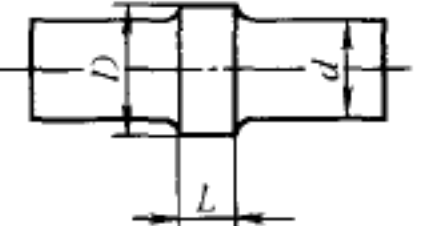
① 740~760°C 为 Cr5Mo 钢的回火温度。

② 截面 150~300mm 工艺参数仅适用于 Cr5Mo 钢锻件。

表 19-9 有效截面计算方法

锻件形状	尺 寸 关 系	有 效 截 面
	$d < D$	d_1
	$H < B \leq 1.5H$	H
	1. $1.5H < B \leq 3H$ 2. $B > 3H$	1. $(1 \sim 1.5)H$ 2. $1.5H$
	$3H < D$	$1.5H$
	1. $1.5H < D \leq 3H$ 2. $H < D \leq 1.5H$	1. $(1 \sim 1.5)H$ 2. H
	1. $d > B$ 2. $d < B$	1. $1.5B$ 2. $(1.5 \sim 2)B$

(续)

锻件形状	尺寸关系	有效截面
	1. $d < B \begin{cases} B < H < 1.5B \\ 1.5B > H \end{cases}$ 2. $d > B \begin{cases} B < H < 1.5B \\ 1.5B < H \end{cases}$	1. $\begin{cases} (1 \sim 1.5)B \\ (1.5 \sim 2)B \end{cases}$ 2. $\begin{cases} B \\ (1 \sim 1.5)B \end{cases}$
	1. $H < B \leq 1.5H$ 2. $B \geq 1.5H$	1. $(1 \sim 1.5)H$ 2. $1.5H$
	$D < L$	D
	$D < L$	D
	$p < L < D$	L
	$L < d < D$	d

3) 化学热处理(图 19-22 ~ 图 19-25)

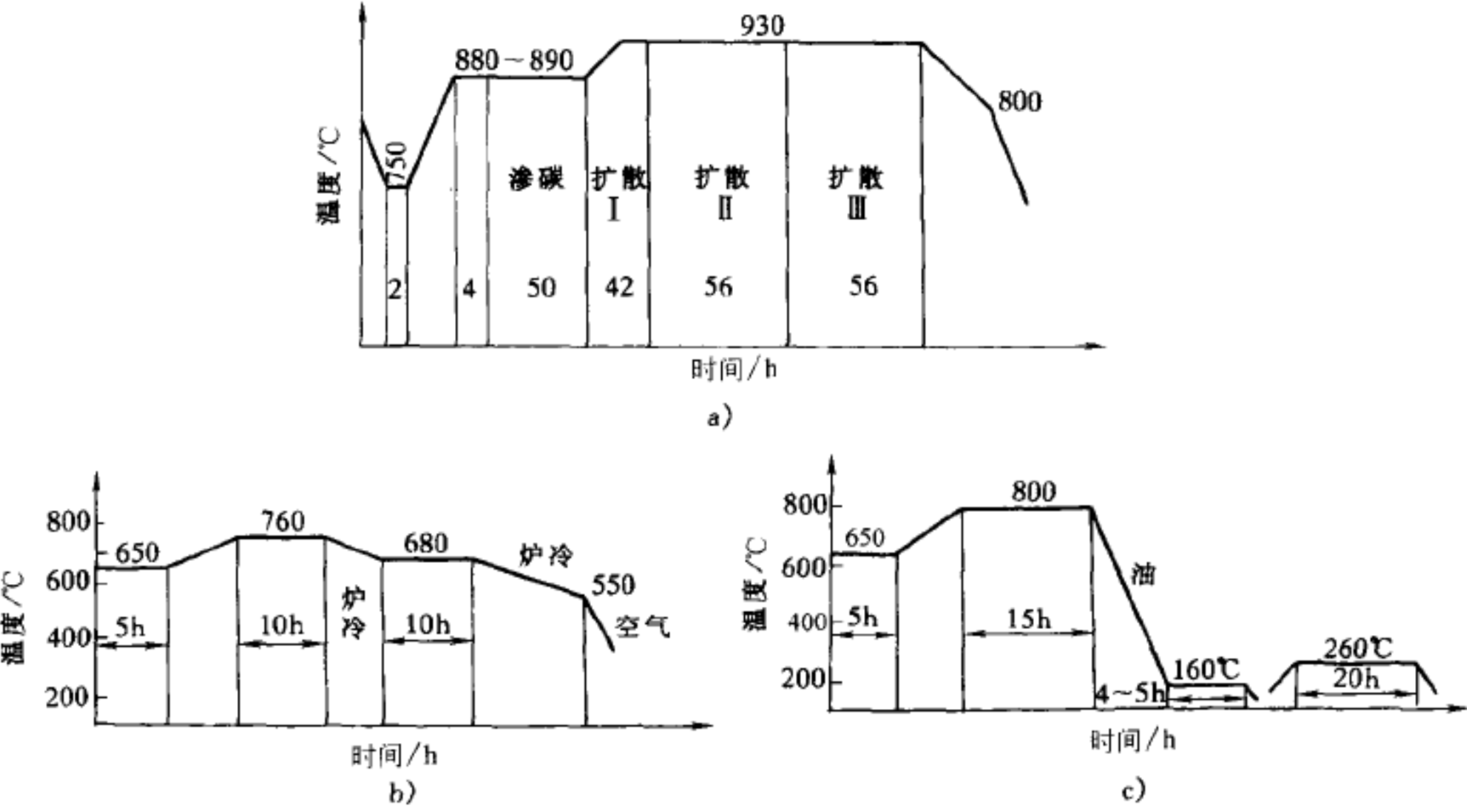


图 19-22 20CrNi2Mo ϕ 980mm 大型齿轮轴渗碳、球化、淬火回火工艺

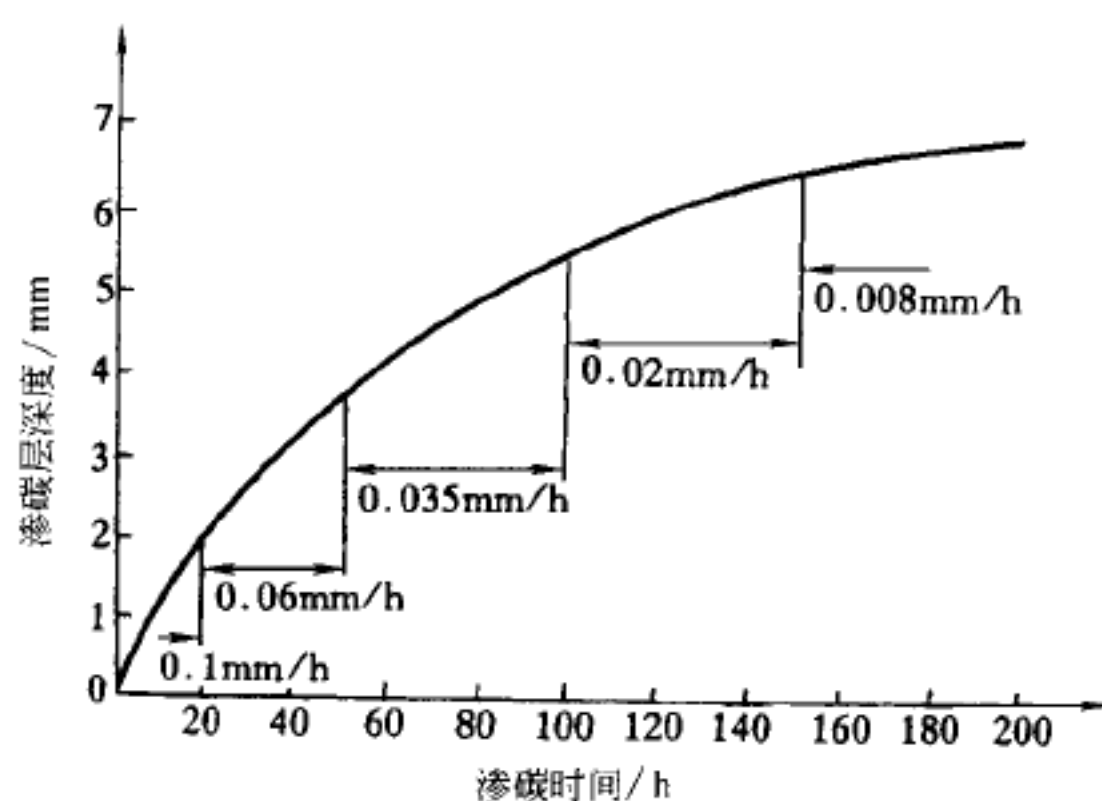


图 19-23 轧机齿轮轴深层渗碳时间-层深关系

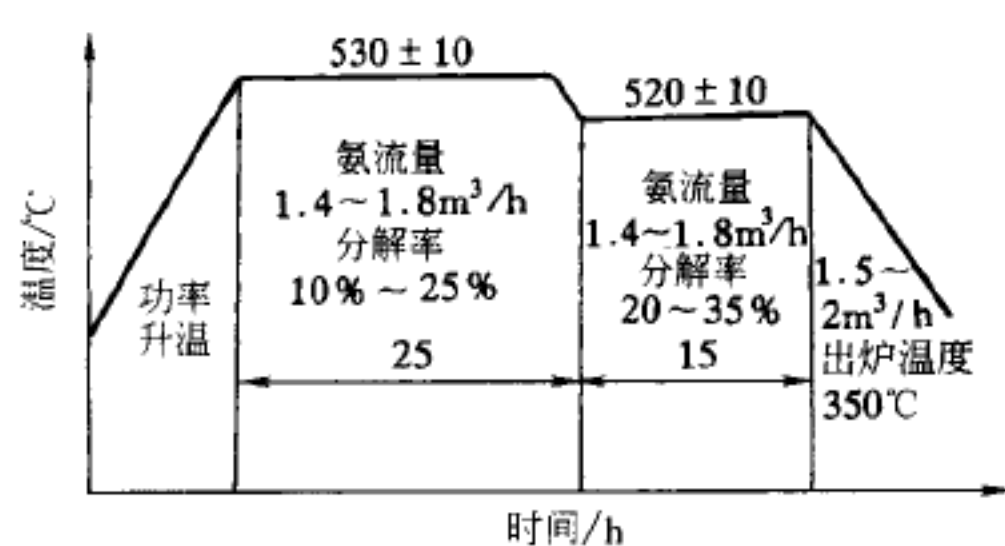


图 19-24 42CrMo 钢大型缸体内孔气体渗氮工艺

要求: 渗氮层深度 0.4~0.45mm, 表面硬

度 530HV₁₀ 脆性: 1 级

4) 加热和冷却(图 19-26 ~ 图 19-89, 表 19-10)

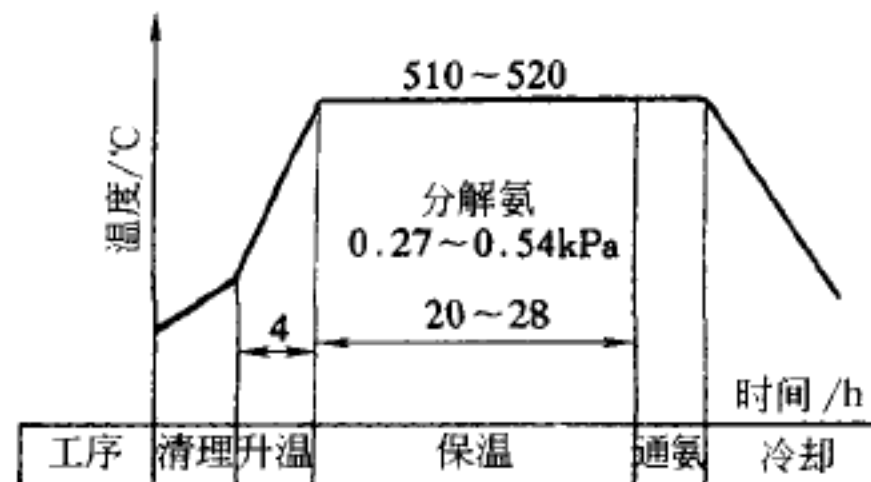


图 19-25 转盘齿轮(35CrMo)离子渗氮工艺

要求: 渗氮层深度 0.4~0.5mm, 表面硬

度 ≥ 500HV 表面脆性: 1 级 脉状组织 < 1 级

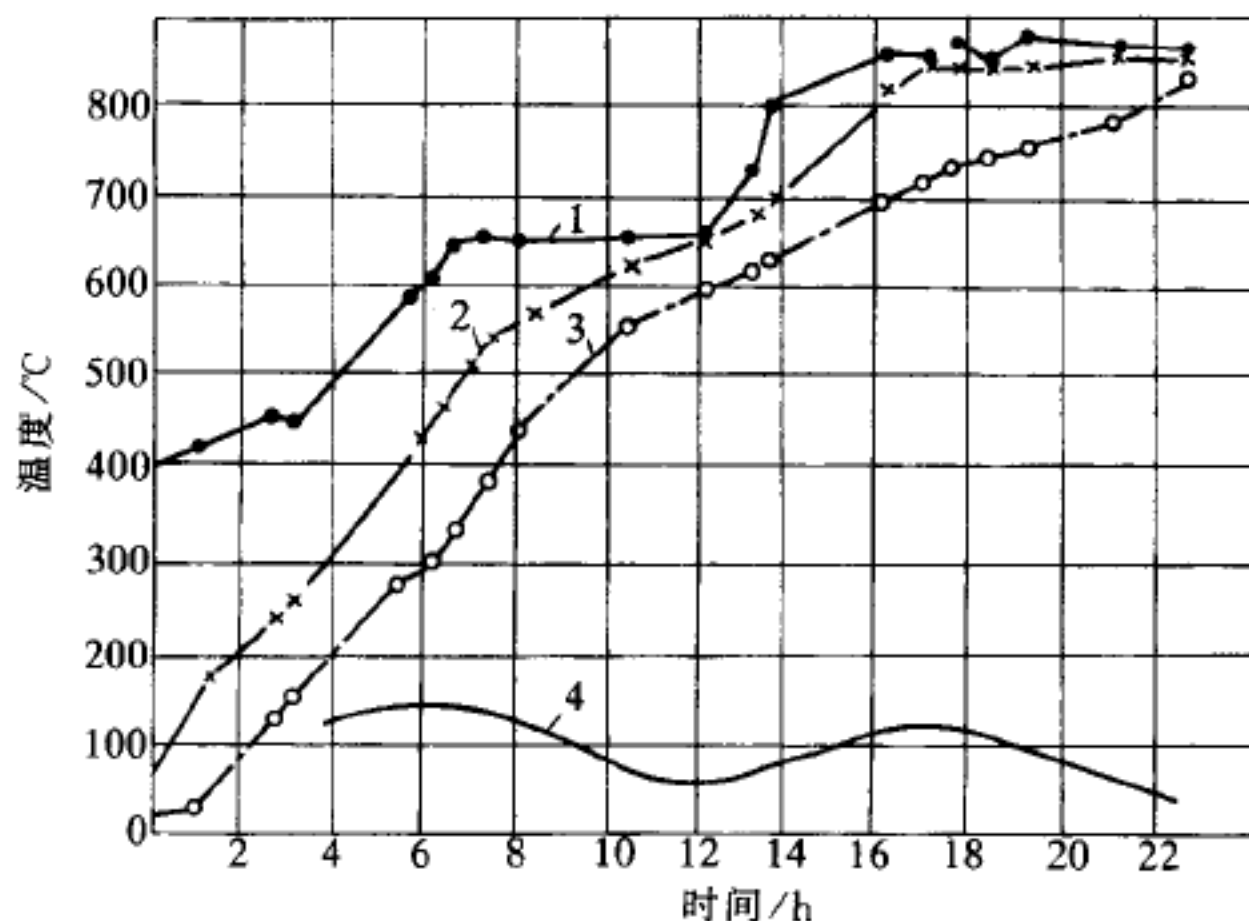
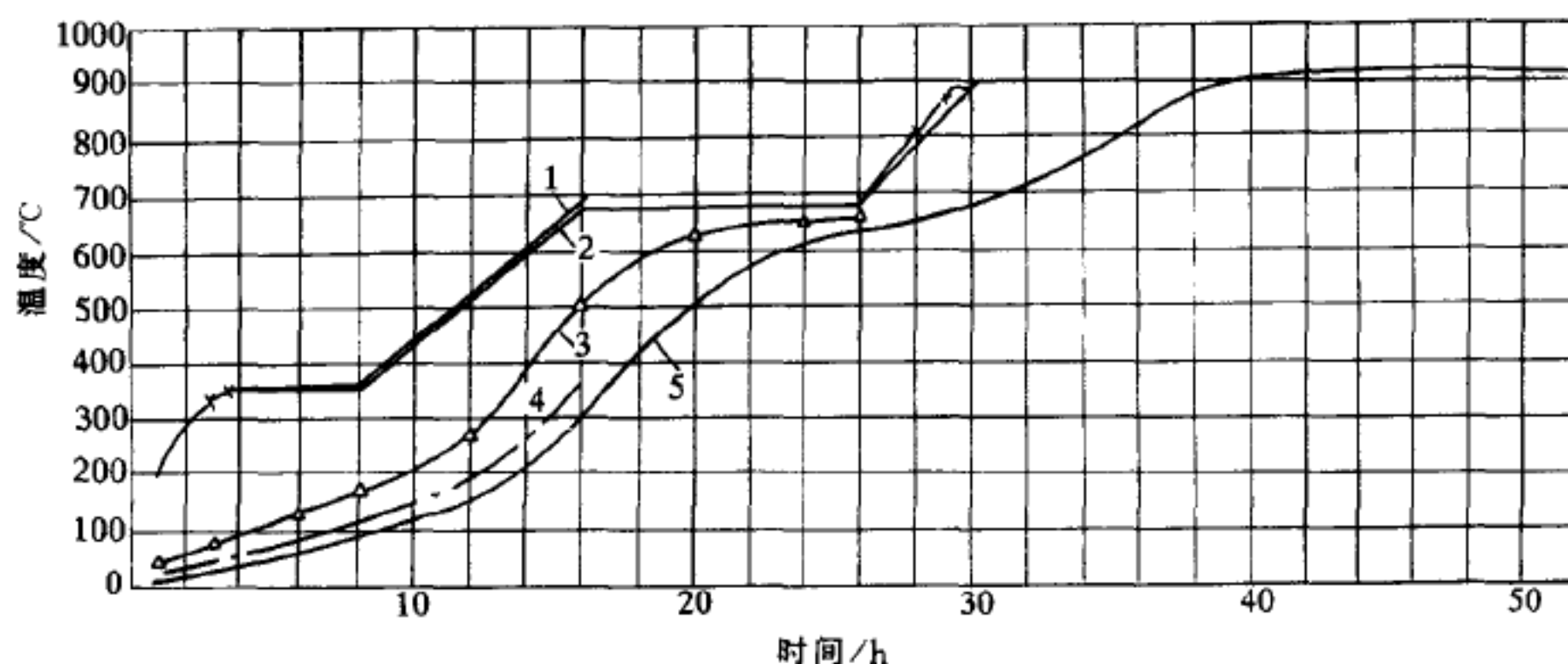


图 19-26 直径 900mm40Cr2MoV 钢阶梯加热曲线

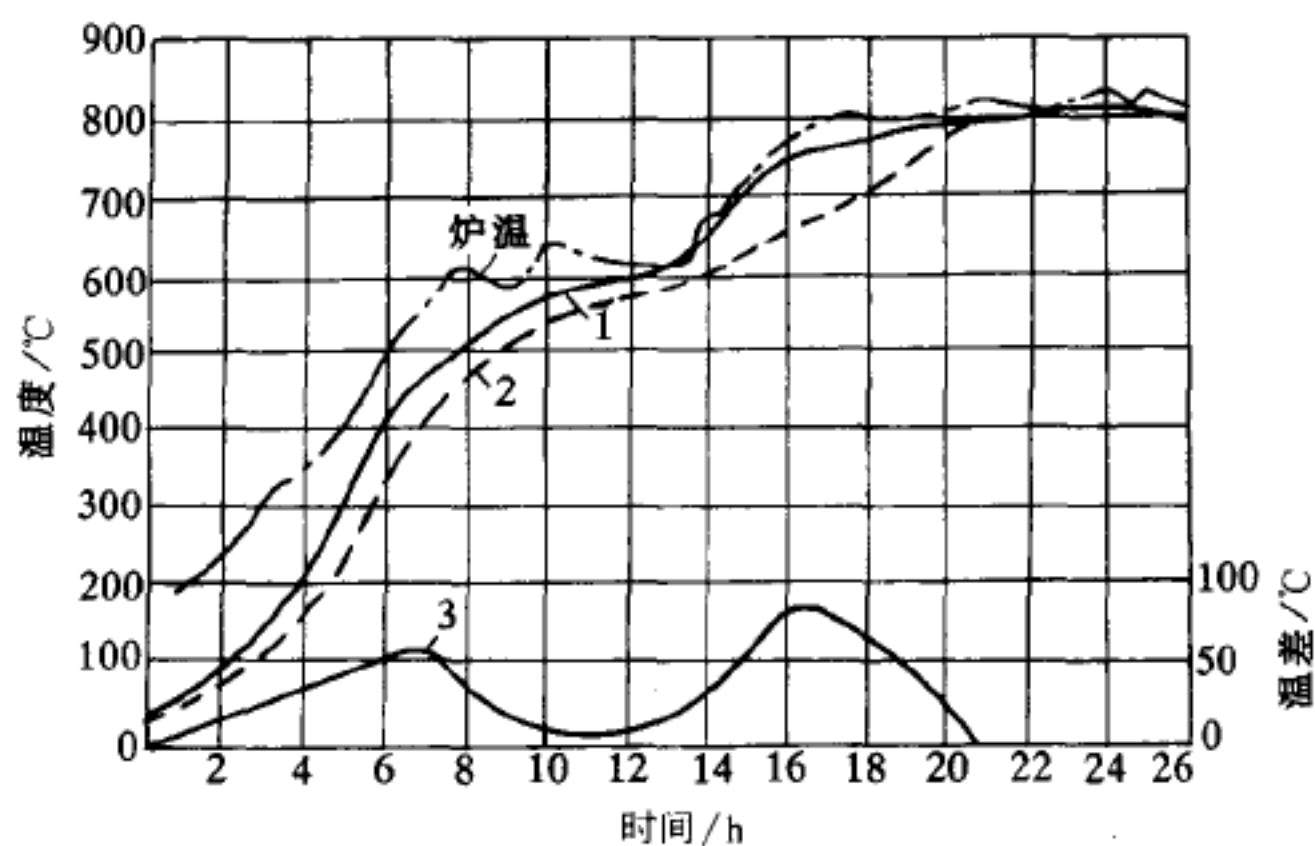
1—炉温 2—工件表面温度 3—工件中心温度 4—表面与中心温差

表 19-10 阶梯加热时最大温差的主要参数

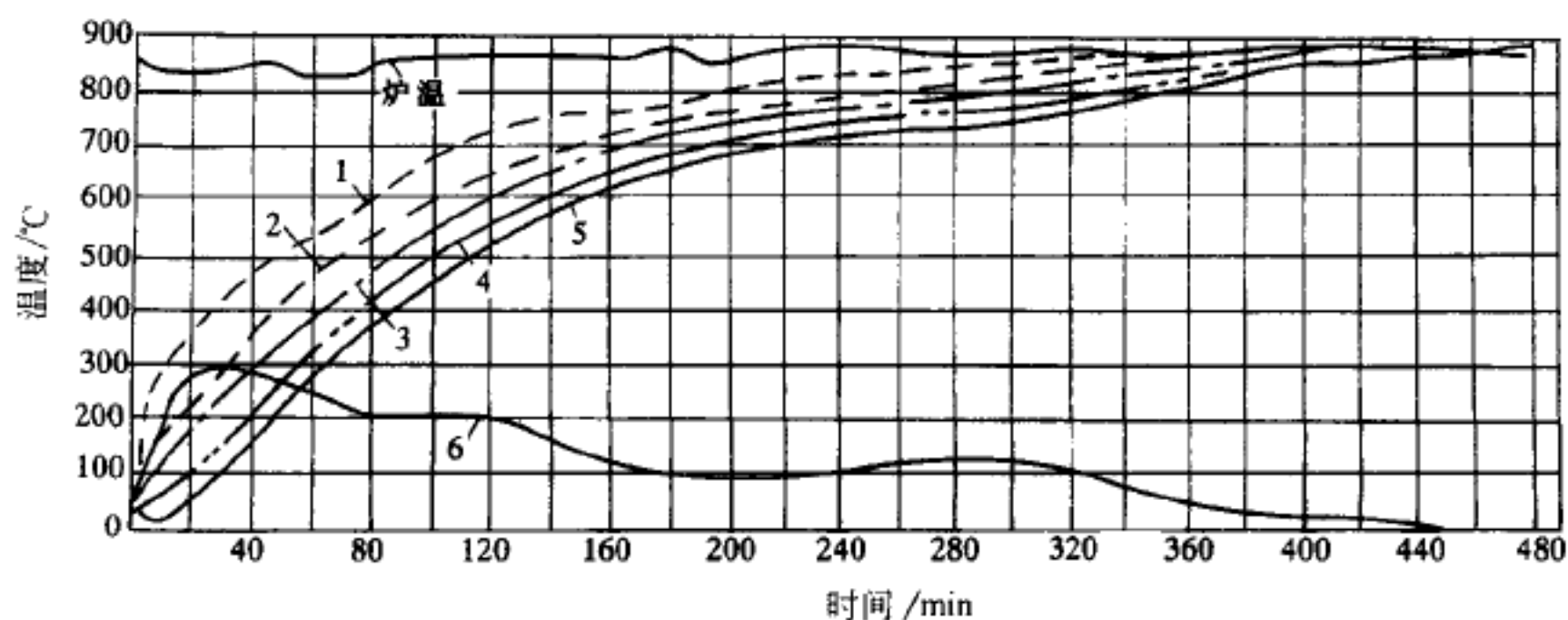
参 数	钢 种			
	34CrMo	34CrMo	40Cr2MoV	34CrNi2Mo
	直径/mm			
	475	700	900	1030
中间保持温度/℃	650	650	650	620
第一个最大温差/℃	40	70	50	60
第二个最大温差/℃	40	90	150	90
第一个最大温差时表面温度/℃	550	500	500	460
第一个最大温差时心部温度/℃	510	430	350	400
第二个最大温差时表面温度/℃	800	800	800	850
第二个最大温差时心部温度/℃	760	710	650	760
从开始加热到第一个最大温差时间/h	8	6.5	7	9
锻件表面加热速度/℃·h ⁻¹	70	70	70	40

图 19-27 26CrNi3MoV 钢制转子正火加热曲线 $\phi 1250\text{mm}$

1—工艺 2—炉温 3—工件表面温度 4—工件 R/2 处温度 5—工件中心温度

图 19-28 $\phi 700\text{mm}$ 34CrMo 钢件加热曲线

1—距表面 25mm 2—中心 3—表面与中心的温差

图 19-29 $\phi 600\text{mm} 34\text{CrNi3Mo}$ 锻件加热曲线 (850℃ 炉温装炉)

1—距表面 10mm 2—距表面 70mm 3—距表面 150mm 4—距表面 200mm 5—距表面 300mm 6—表面与中心温差

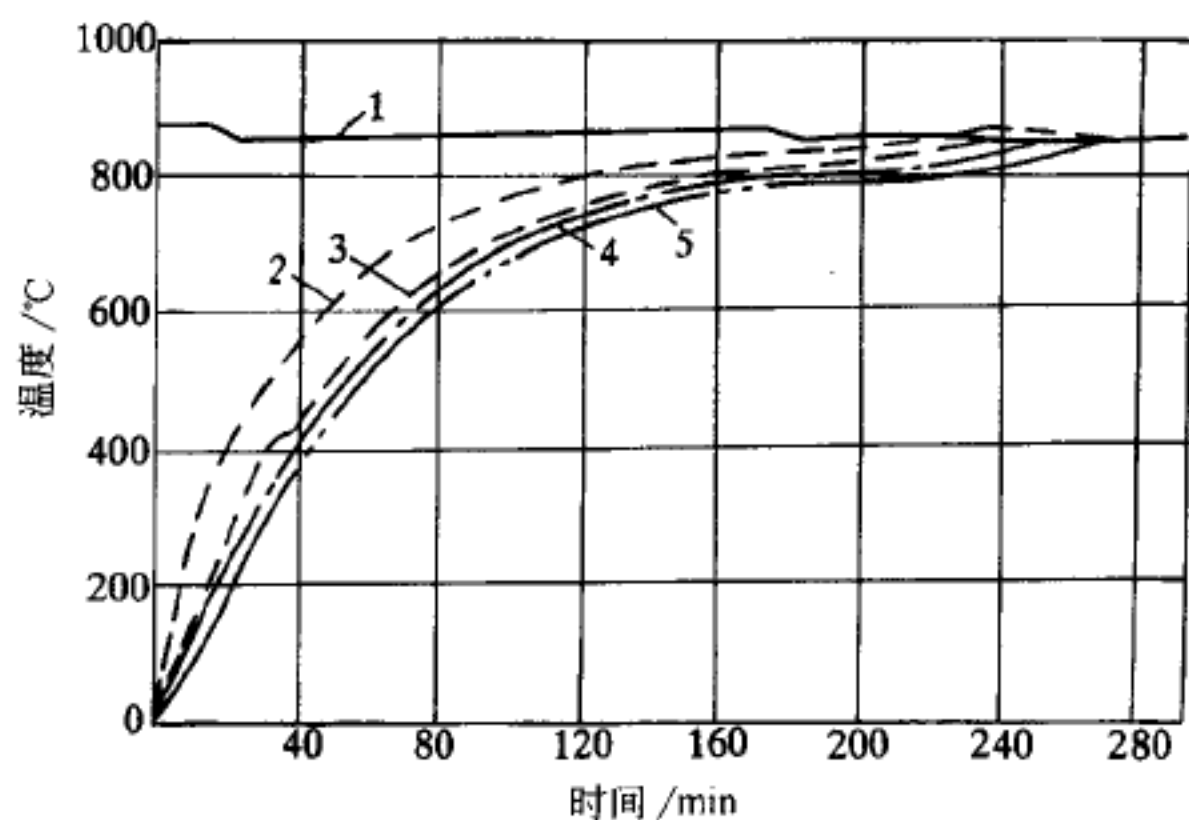
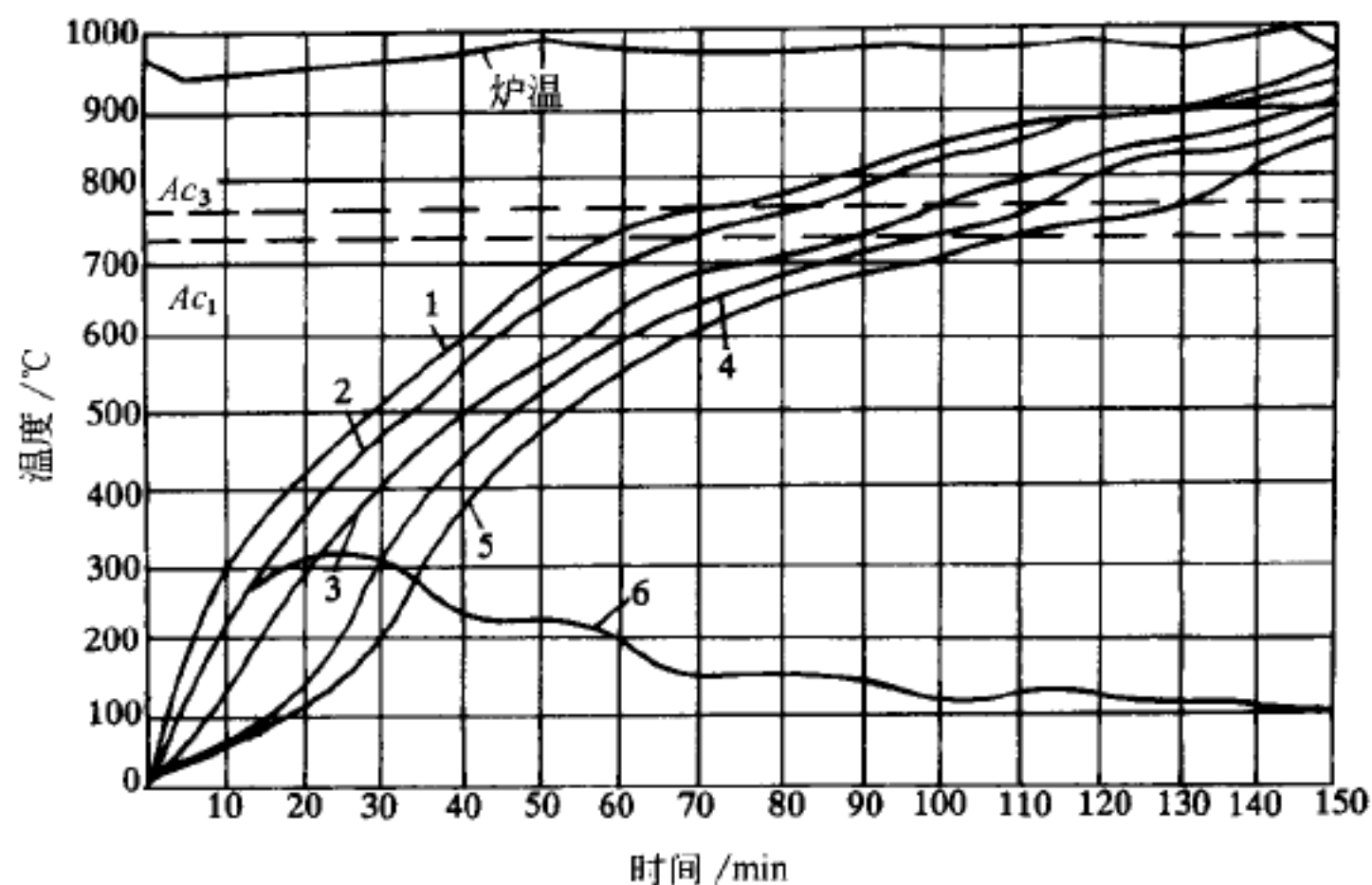


图 19-30 40Cr, 850℃ 装炉, 直径 400mm

1—炉温 2—距表面 10mm 处的温度 3—距表面 75mm 处的温度 4—距表面 130mm 处的温度 5—中心温度

图 19-31 $\phi 460\text{mm} \times 2000\text{mm} 50\text{Mn}$ 钢件加热曲线

1—距表面 15mm 2—距表面 30mm 3—距表面 65mm 4—距表面 120mm 5—距表面 230mm 6—表面与中心温差

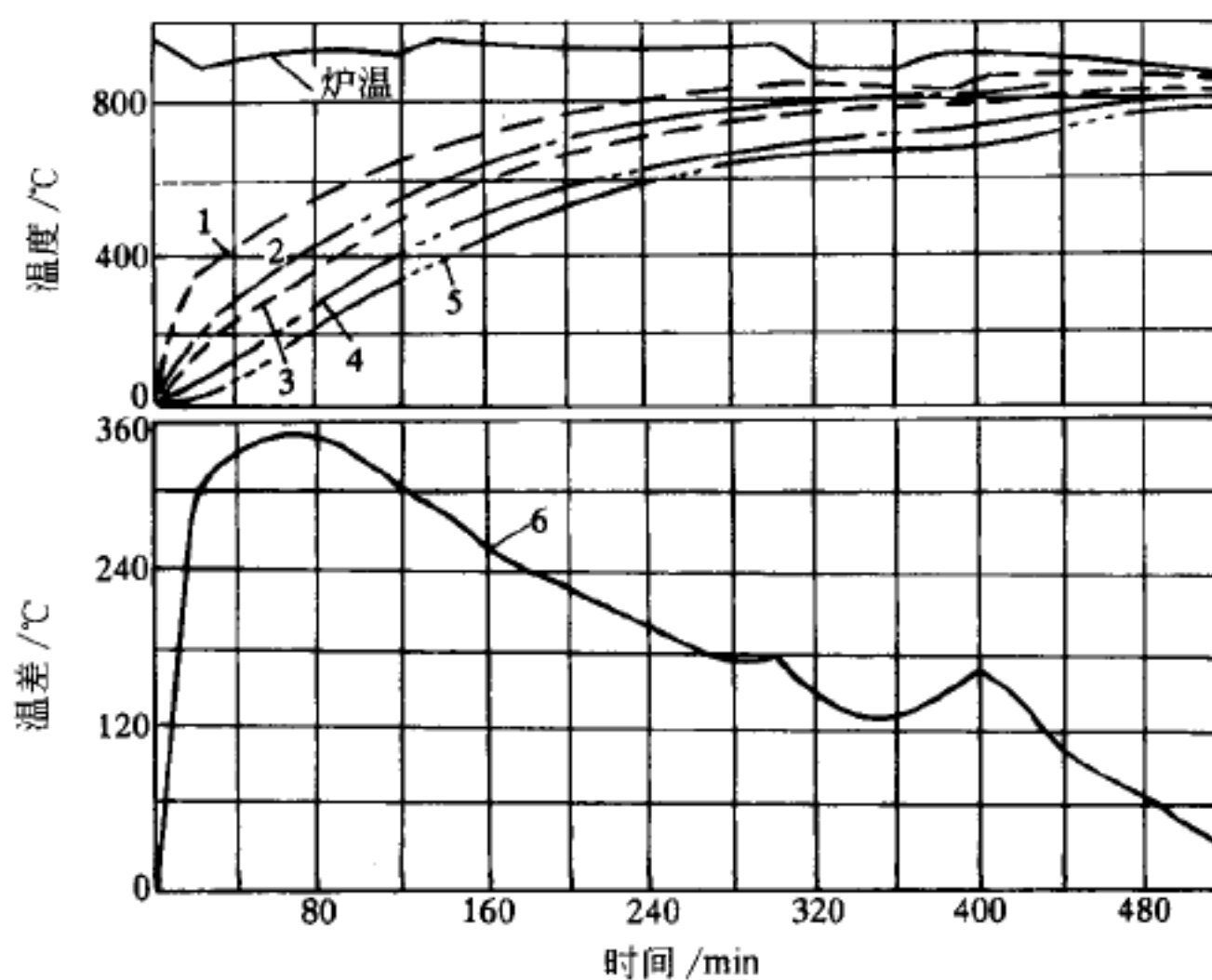


图 19-32 $\phi 800\text{mm}$ 40CrNi 钢坯加热曲线(950℃ 炉温装炉)

1—距表面 10mm 2—距表面 70mm 3—距表面 130mm
4—距表面 260mm 5—距表面 400mm 6—表面与中心温差

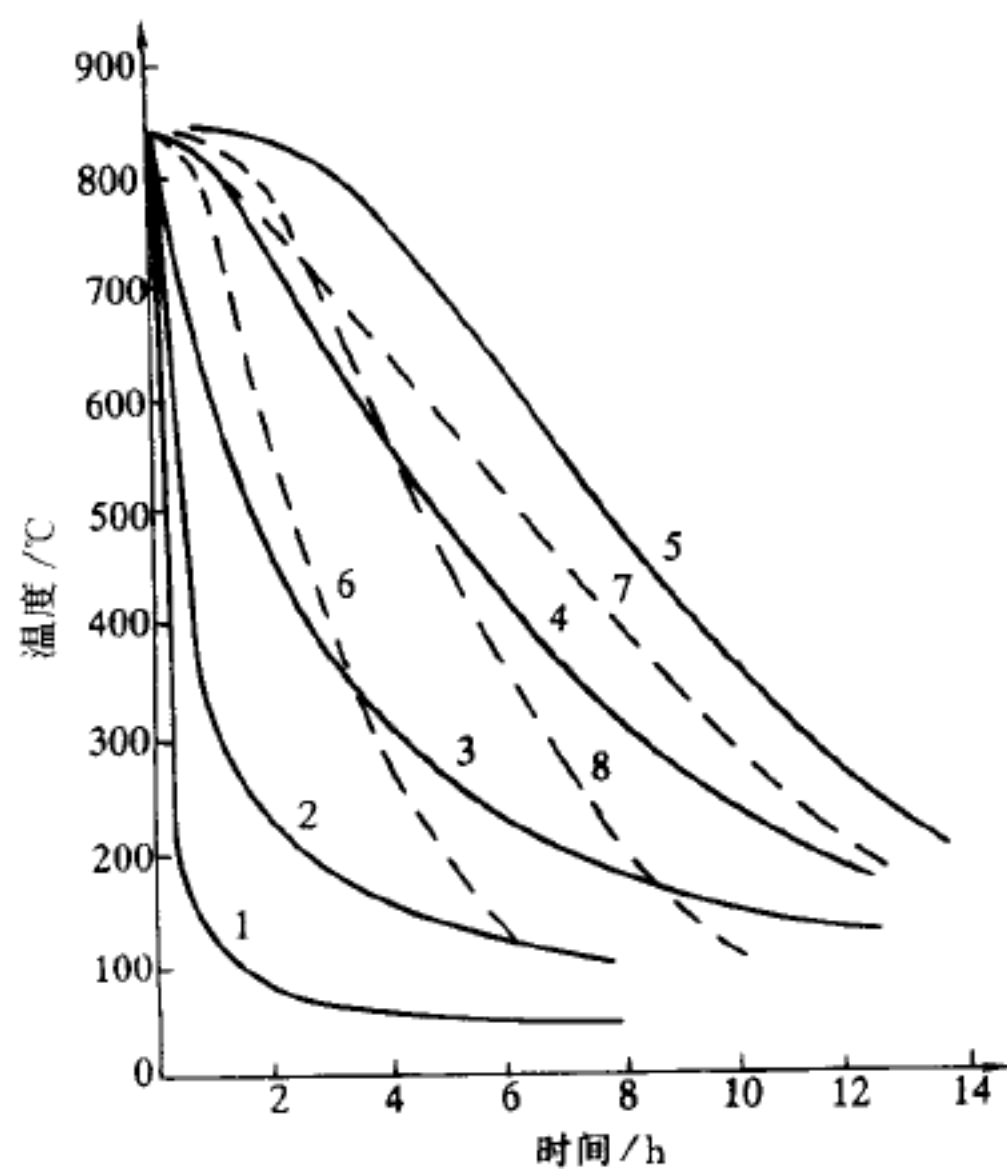


图 19-33 转子锻件冷却曲线

1— $\phi 1800\text{mm}$, 喷水, 距表面 15mm 2— $\phi 1800\text{mm}$, 喷水, 距表面 100mm 3— $\phi 1800\text{mm}$, 喷水, 距表面 200mm 4— $\phi 1800\text{mm}$, 喷水, 距表面 450mm 5— $\phi 1800\text{mm}$, 喷水, 中心 6— $\phi 1020\text{mm}$, 喷水, 中心 7— $\phi 1020\text{mm}$, 空冷, 中心 8—直径 120mm, 油冷

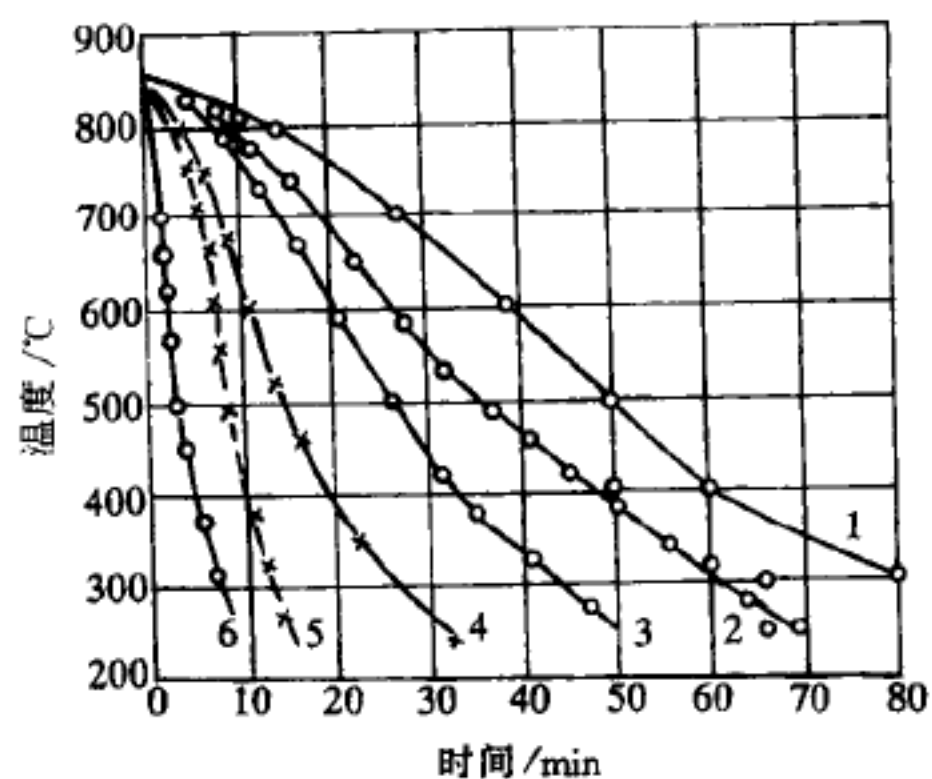


图 19-34 直径 120 ~ 560mm 工件心部水冷和油冷时的冷却曲线

1—直径 560mm, 油冷 2—直径 400mm, 油冷 3—直径 560mm, 水冷 4—直径 250mm, 油冷 5—直径 400mm, 水冷 6—直径 250mm, 水冷

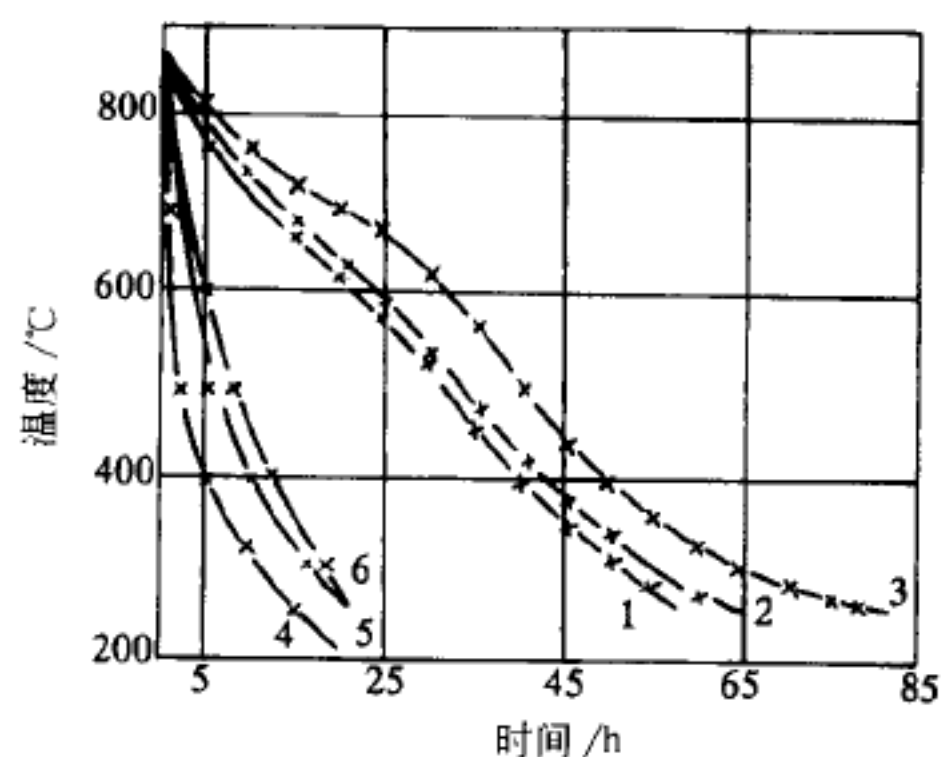


图 19-35 直径为 1120mm 转子炉冷
(1~3)和空冷(4~6)曲线

1、4—距表面 30mm 2、5—距表面 250mm
3、6—距表面 500mm

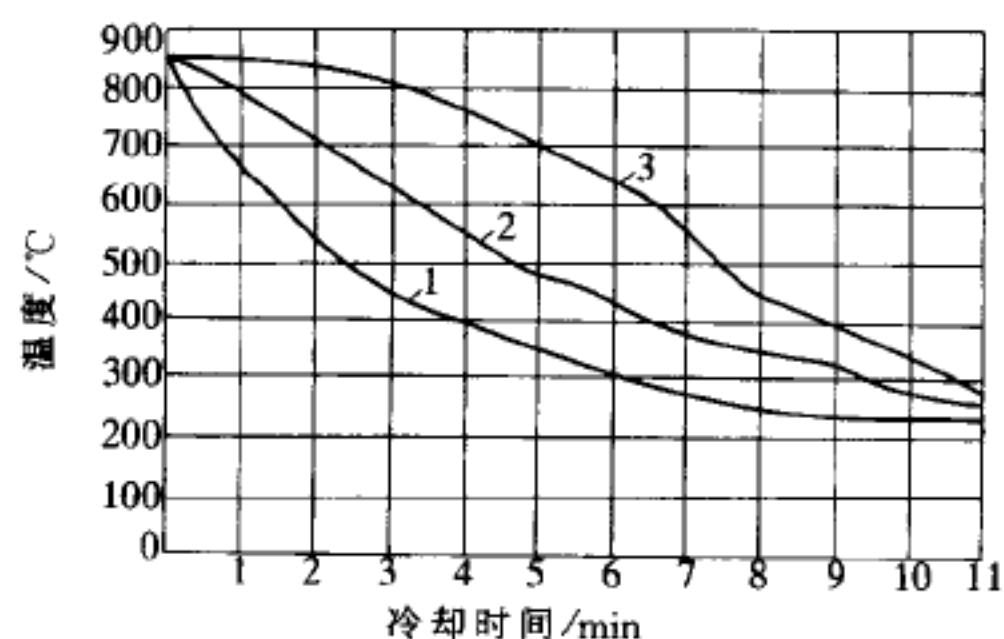


图 19-36 直径 200mm 的
37MnSi 钢件水冷冷却曲线

1—表面 2— $\frac{1}{3}R$ 3—中心

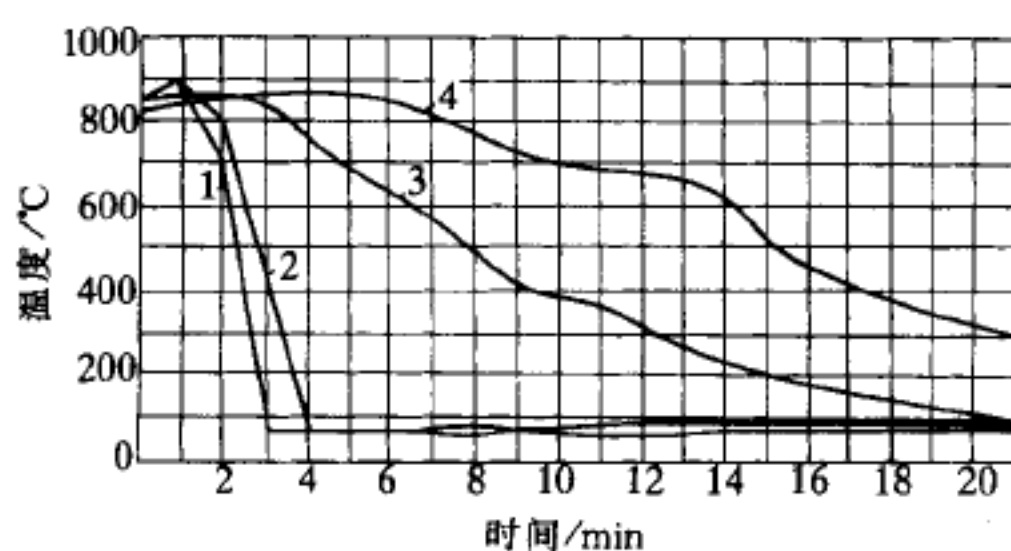
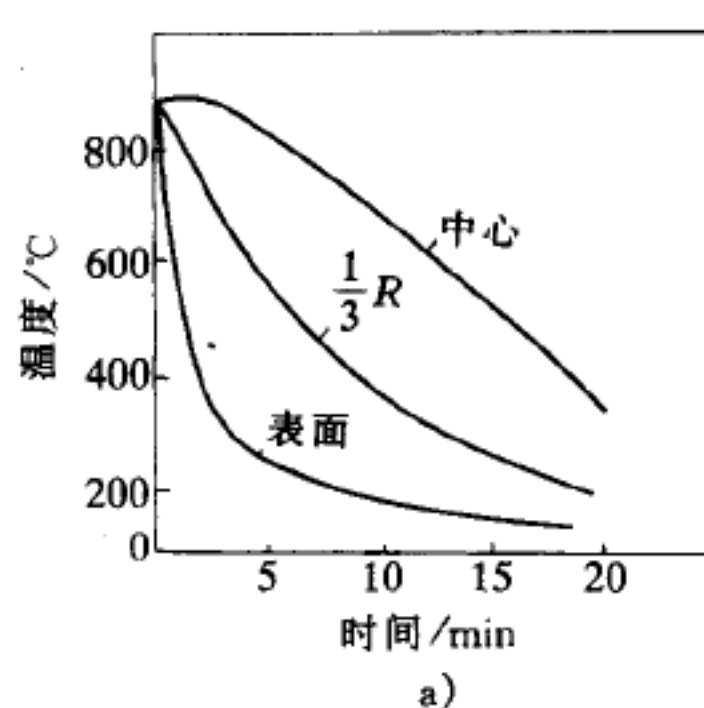
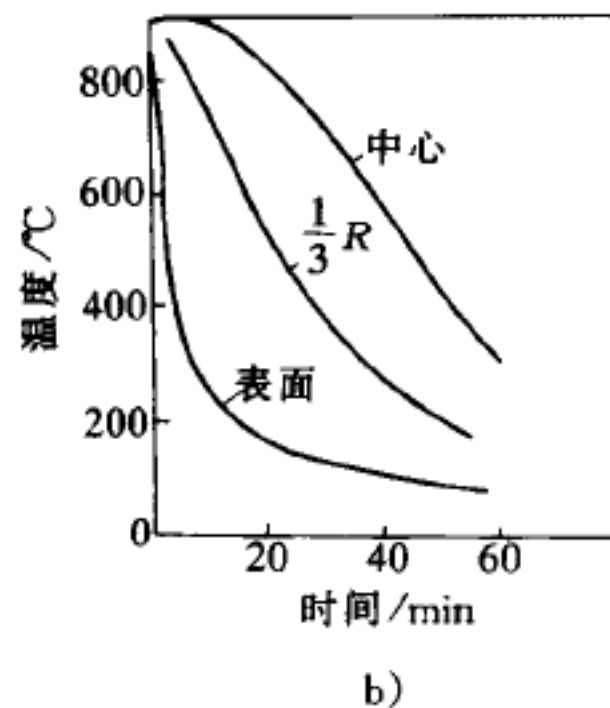


图 19-37 直径 300mm 的 9Cr 钢件水冷冷
却曲线,加热温度表面 900°C

距表面:1—15mm 2—30mm 3—75mm 4—150mm



a)



b)

图 19-38 直径 250mm 和 450mm 42SiMn 钢坯
水冷冷却曲线($\frac{1}{3}R$ 处指距表面 $\frac{1}{3}$ 半径处)

a) $\phi 250, 42SiMn$ b) $\phi 450, 42SiMn$

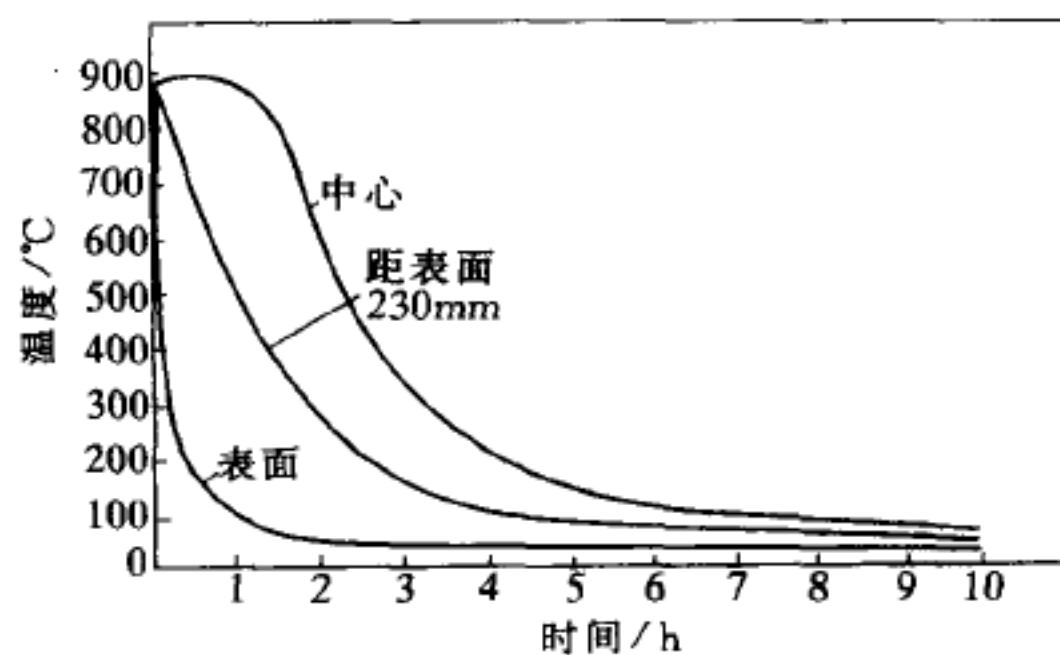


图 19-39 直径 920mmNiCrMoV 钢坯水冷冷却曲线

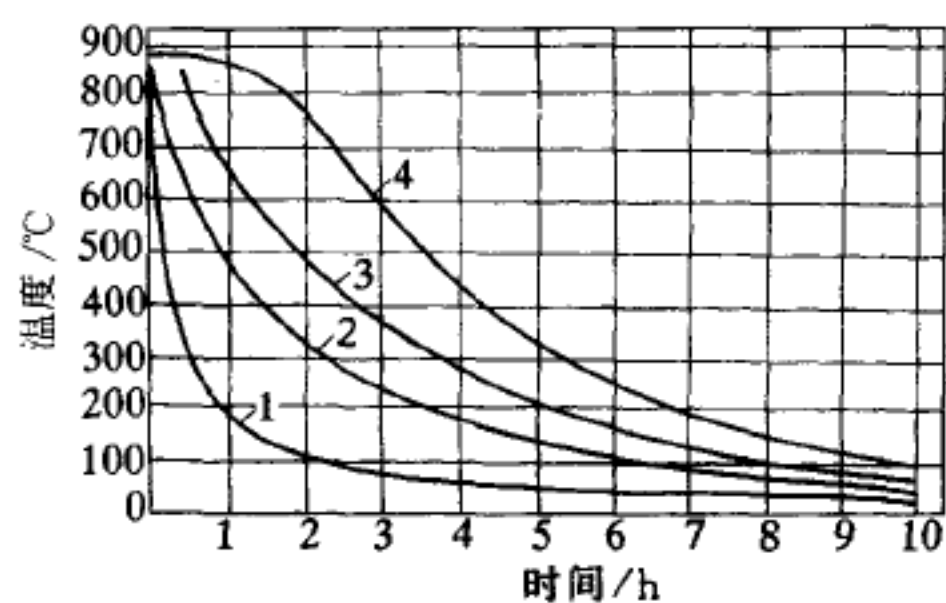


图 19-40 直径 1350mm 钢坯水冷冷却曲线
距表面:1—表面 2—225mm 3—450mm 4—675mm

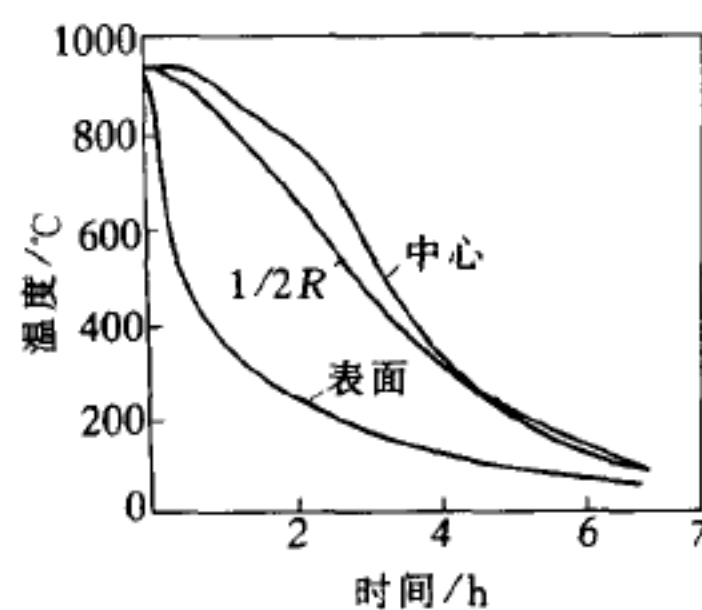


图 19-41 直径 1270mm 钢坯水冷冷却曲线

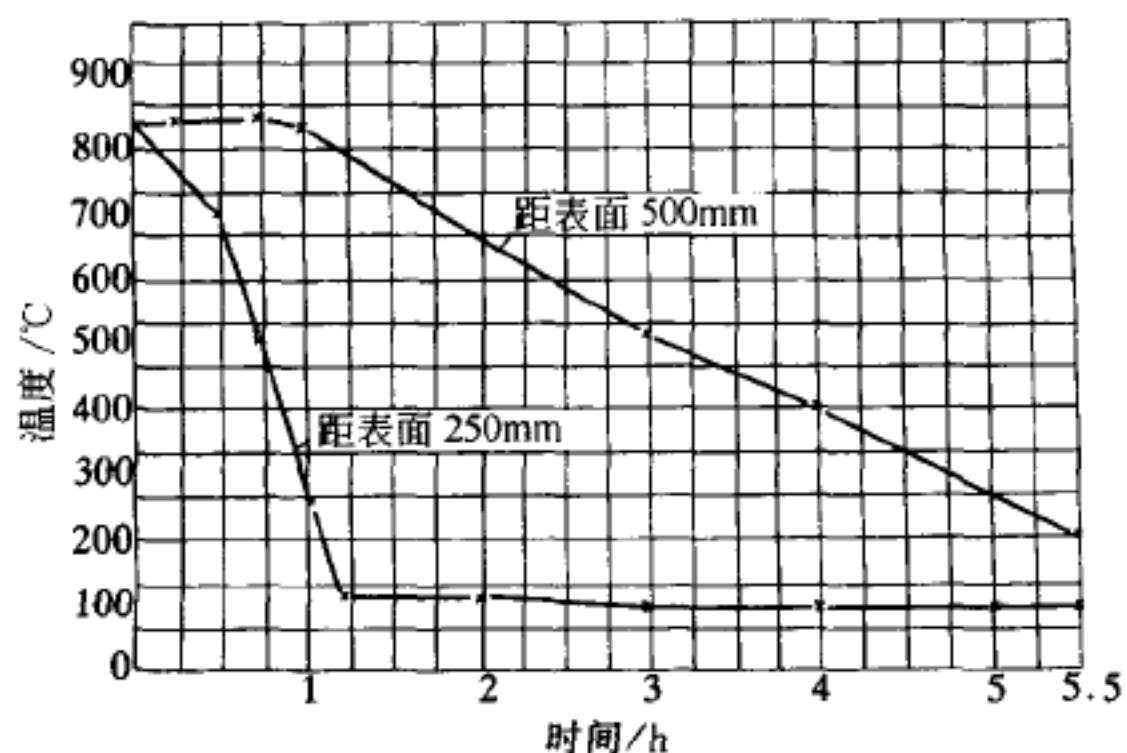


图 19-42 试验件水淬轴身中心, 1/2 半径处冷却曲线[阶梯轴 $\phi 1150\text{mm} \times 1500\text{mm} / \phi 650\text{mm} \times 2100\text{mm}$, 重 13.9t, 20CrNi3MoV 5m \times 3m \times 5m 水槽循环水冷, $\phi 1150\text{mm}$ 中心和 $R/2$ 冷却曲线]

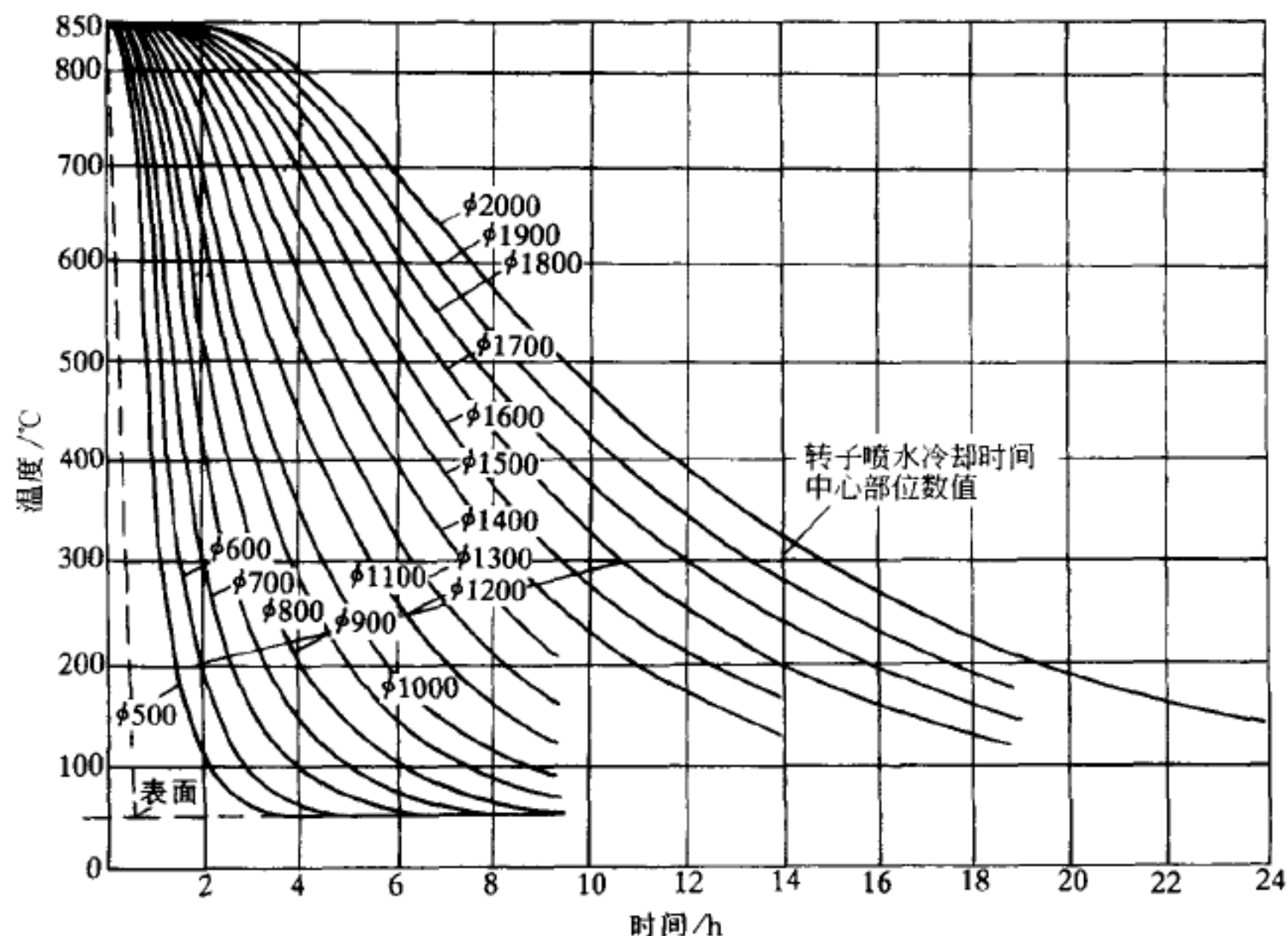


图 19-43 各种直径轴类件水(喷水)淬火时中心部冷却曲线计算结果

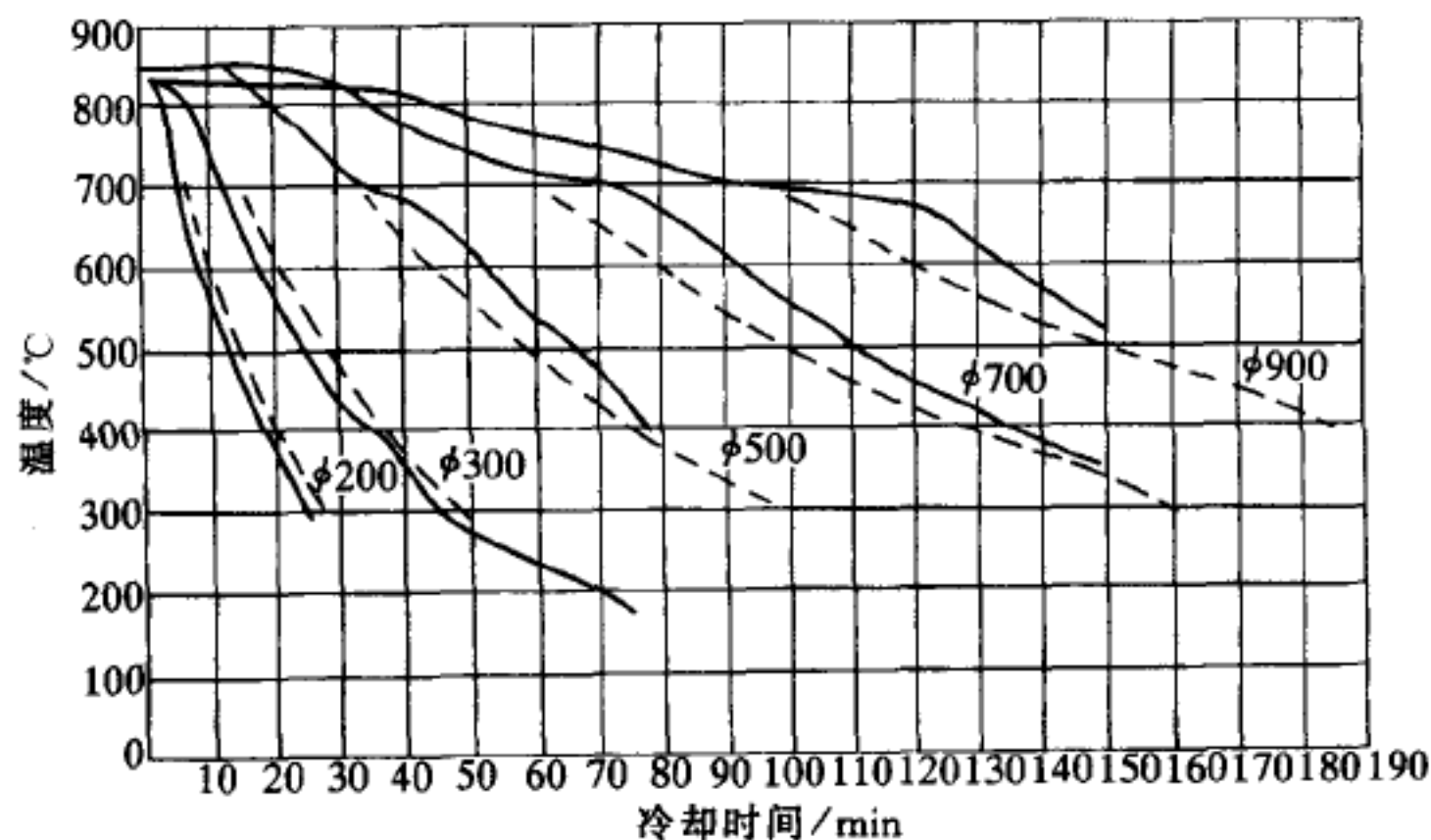


图 19-44 不同截面工件油冷中心冷却曲线(40Cr2MoV)

实线—实验结果 虚线—计算结果

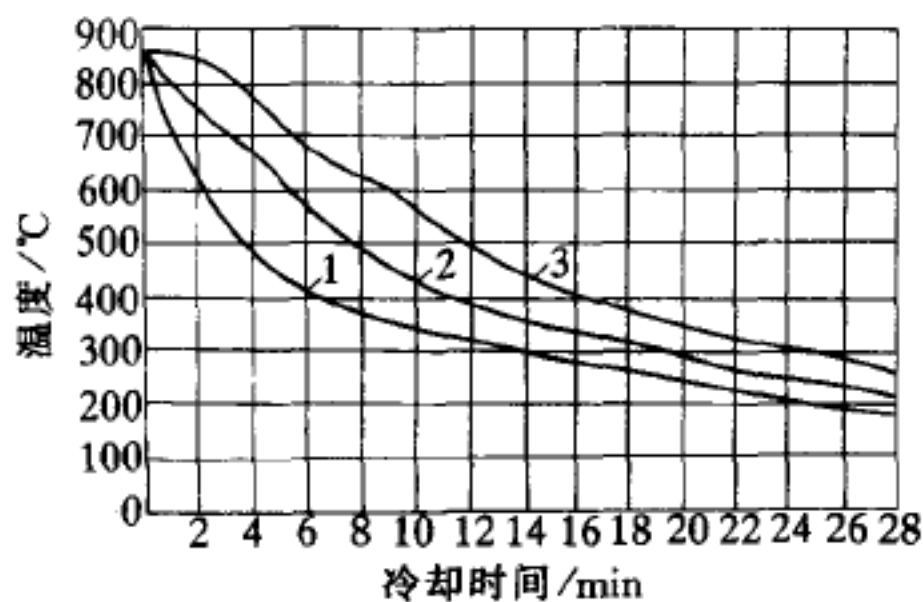


图 19-45 直径 200mm 40Cr2MoV 钢坯油冷冷却曲线

1—表面 2—1/3 R 3—中心

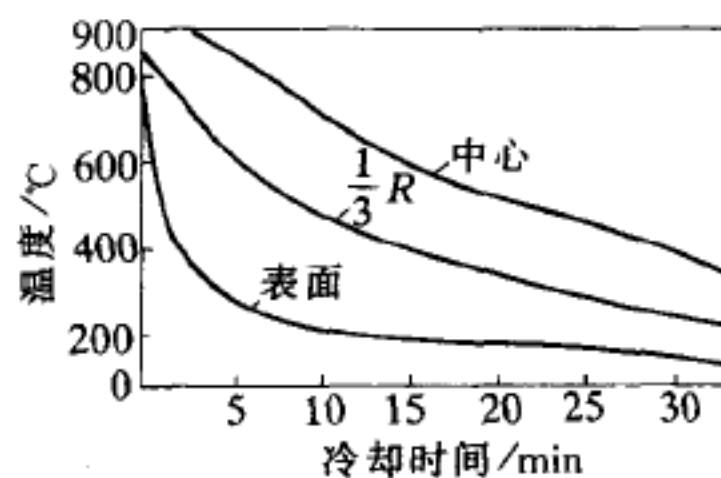


图 19-46 直径 250mm 38CrSiMn2Mo 钢坯油冷冷却曲线

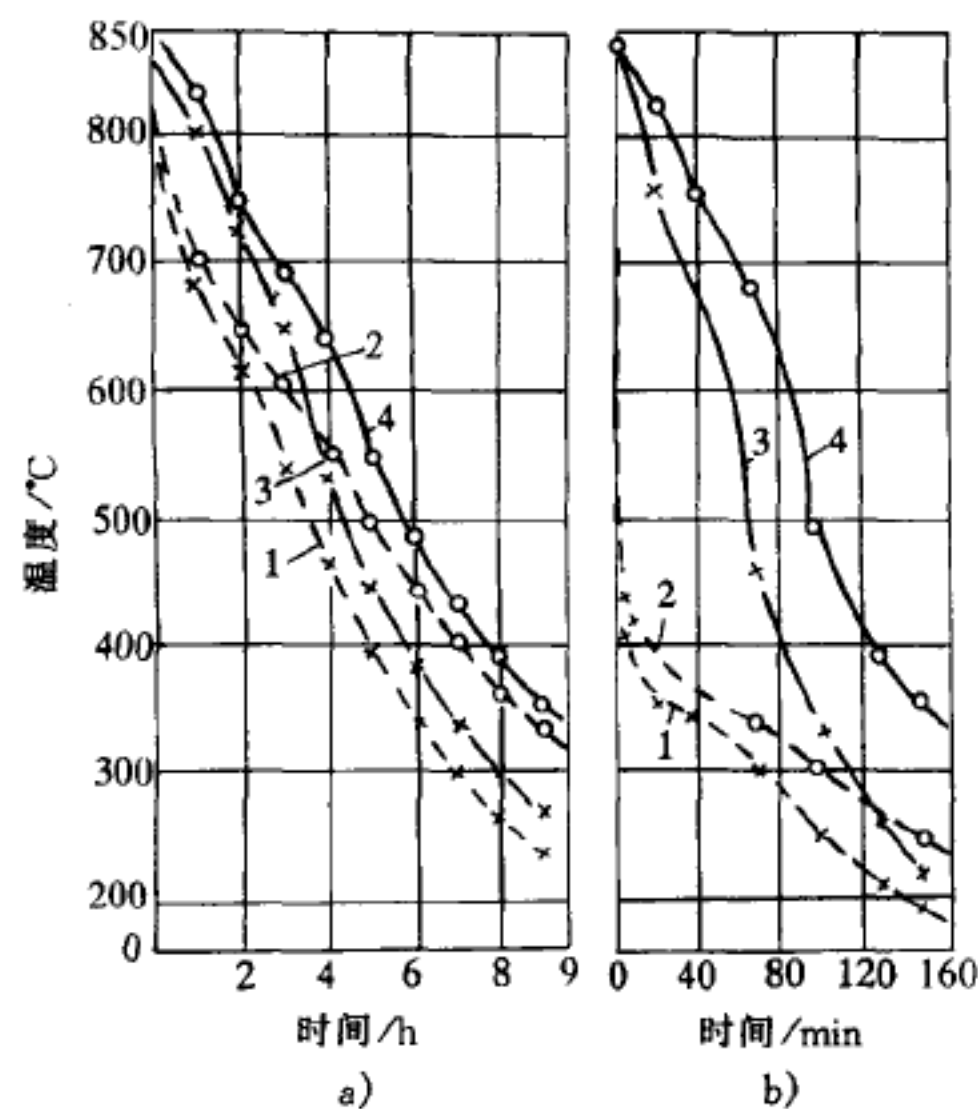


图 19-47 直径 650, 500mm 34CrNi1Mo 钢
a) 空冷
1, 2—距表面 30mm 3—距表面 250mm 4—距表面 325mm
b) 油冷
1, 3—直径 500mm 2, 4—直径 650mm

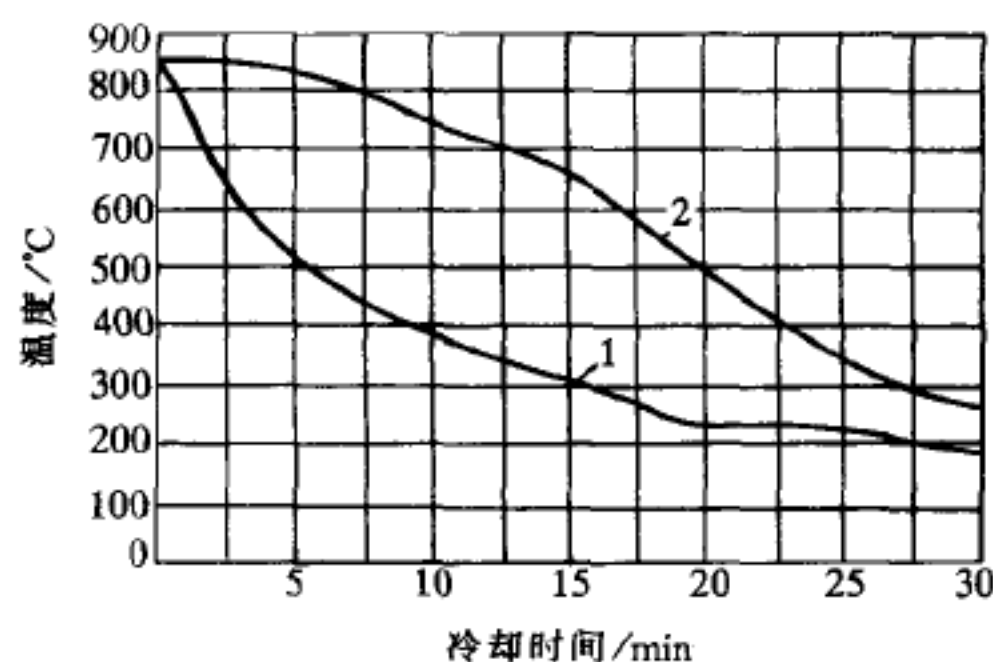


图 19-50 直径 300mm 的 37SiMn5 钢坯油冷曲线
1—表面 2—中心

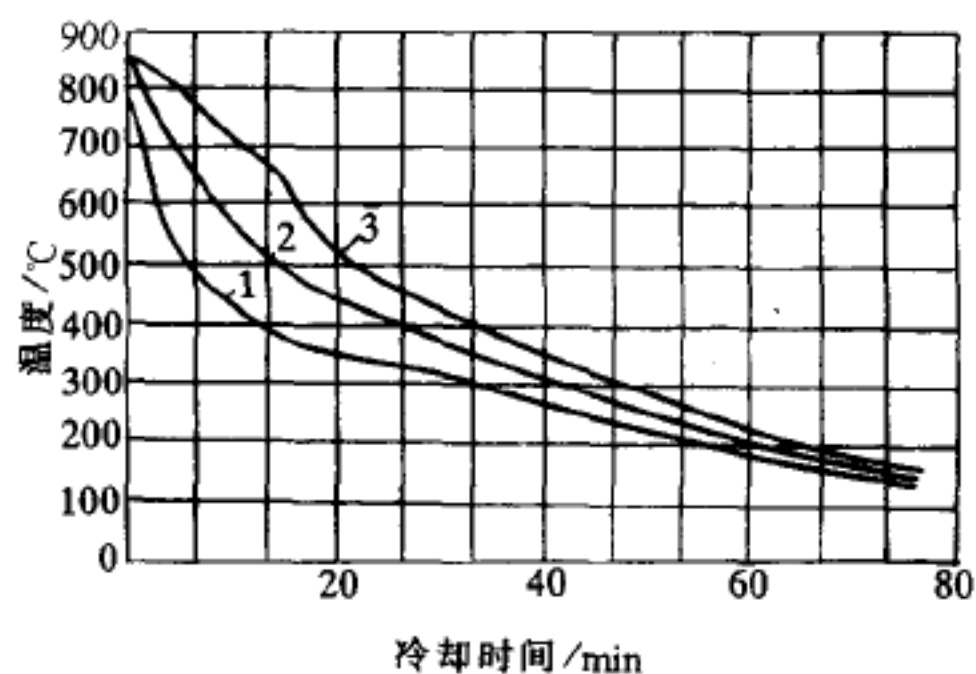


图 19-52 直径 300mm 的 40Cr2MoV 钢坯油冷曲线
1—表面 2— $R/3$ 3—中心

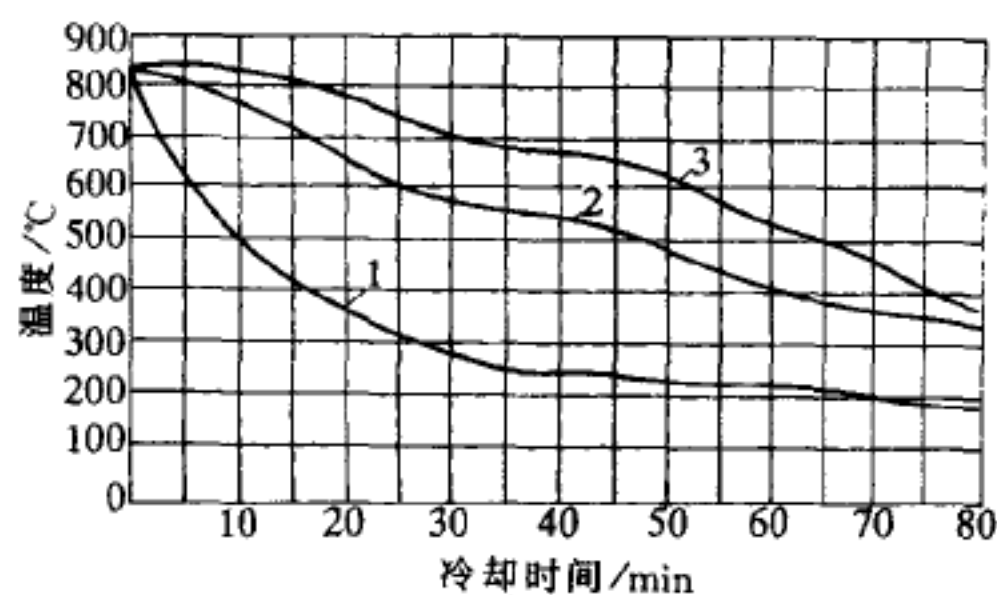


图 19-48 直径 500mm 的 40Cr2MoV 钢坯油冷曲线
1—表面 2— $R/3$ 3—中心

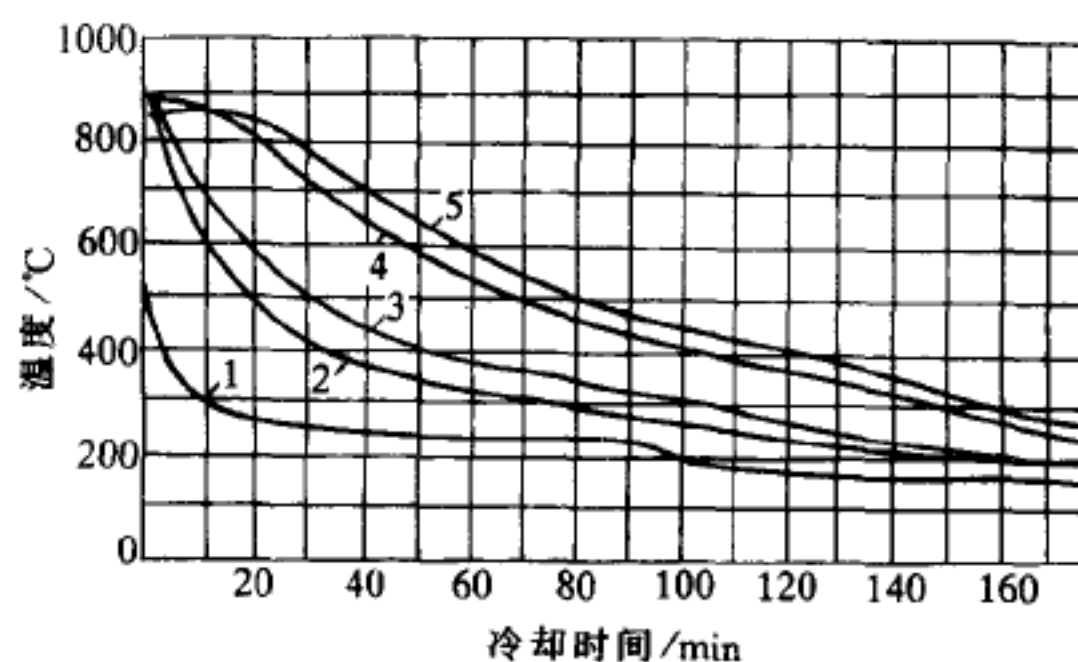


图 19-49 直径 600mm 的 34CrNi3Mo 钢坯油冷曲线
距表面: 1—10mm 2—70mm 3—105mm
4—200mm 5—300mm

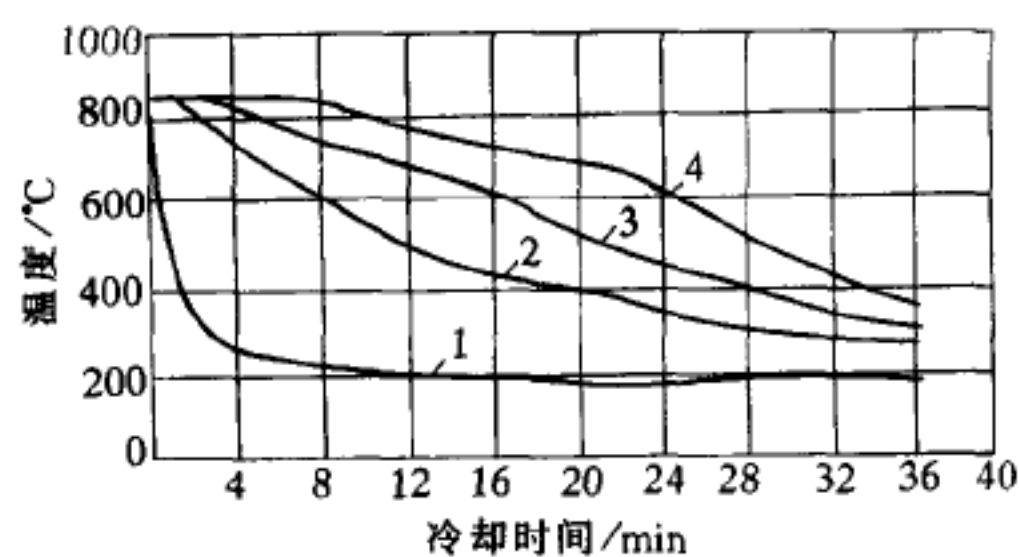


图 19-51 直径 400mm 的 40Cr 钢坯油冷曲线
距表面: 1—10mm 2—75mm 3—130mm 4—200mm

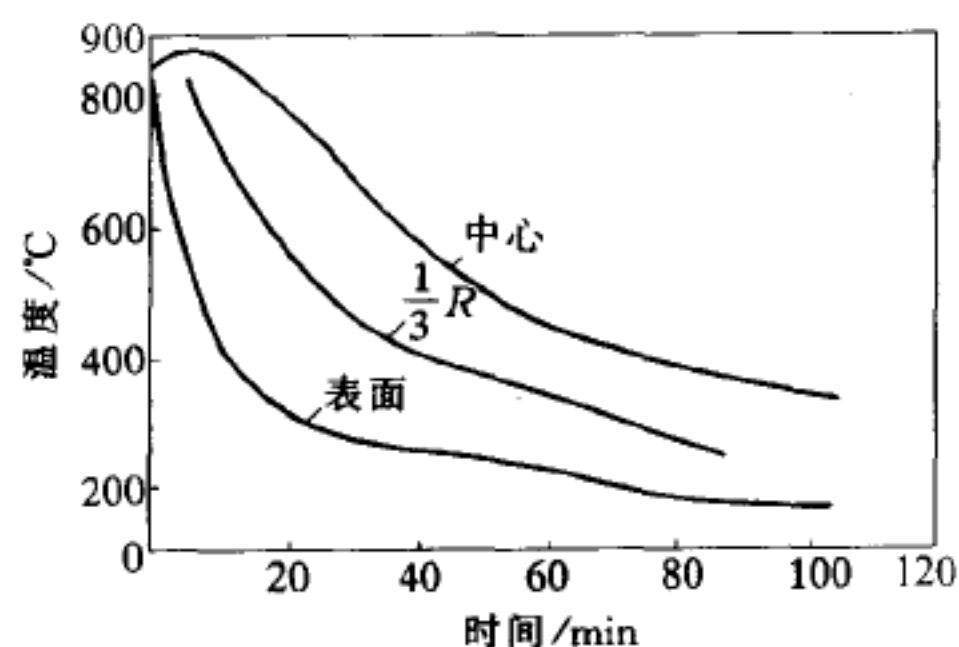


图 19-53 直径 450mm 38CrSiMn2Mo 钢坯油冷曲线

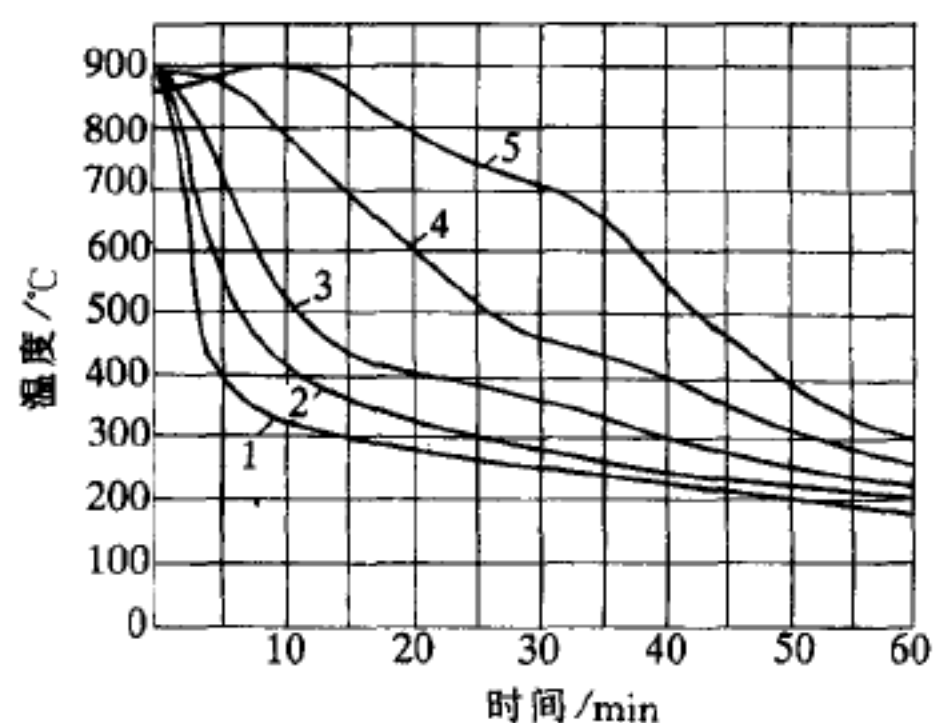


图 19-54 直径 460mm 50Mn 钢坯油冷曲线

距表面: 1—15mm 2—30mm 3—65mm
4—120mm 5—230mm

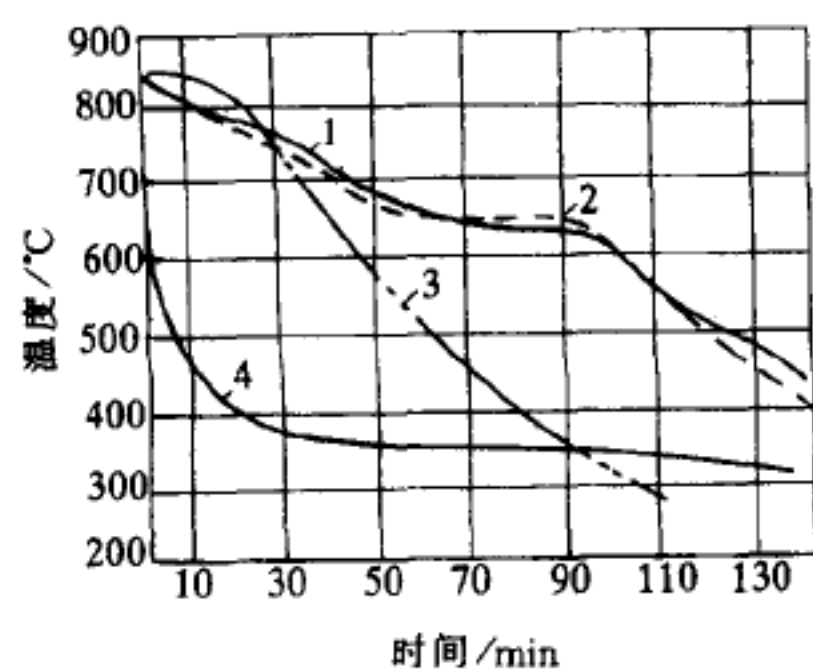


图 19-55 直径 700mm 35CrMo 钢坯油冷曲线

1—中心 2—中心计算曲线(考虑热效应)
3—中心计算曲线(没有考虑热效应) 4—距表面 25mm

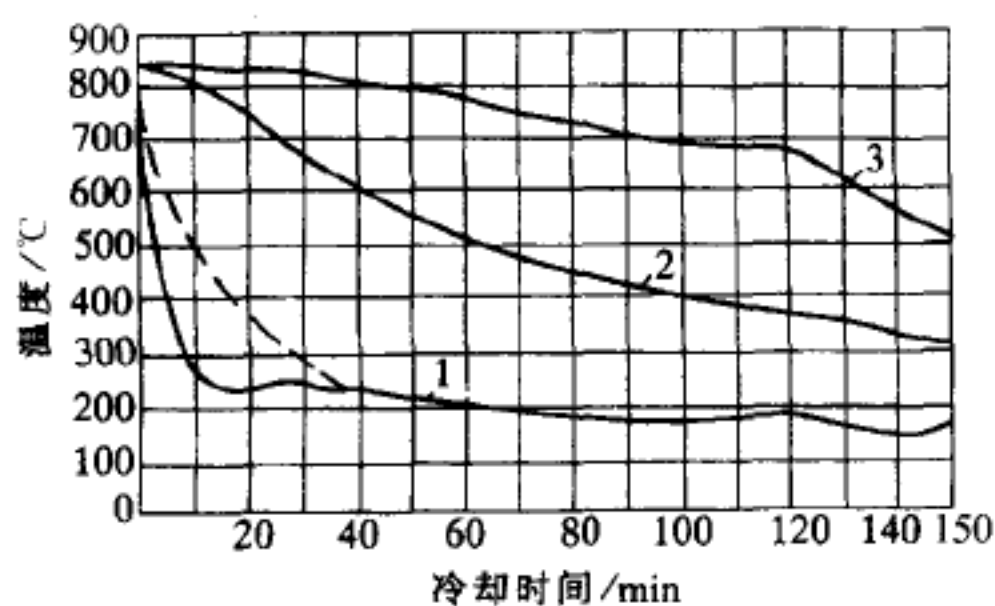


图 19-56 直径 700mm 40Cr2MoV 钢坯油冷曲线

1—表面 2— $R/3$ 3—中心

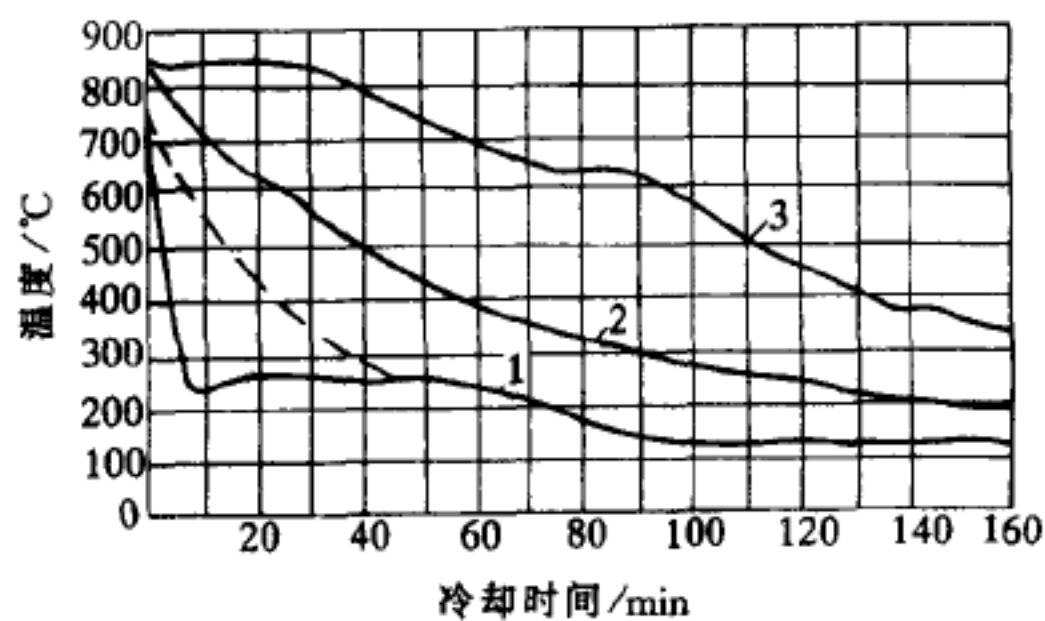


图 19-57 直径 900mm 40CrMoV 钢坯油冷曲线

1—表面(虚线为计算曲线) 2— $R/3$ 3—中心

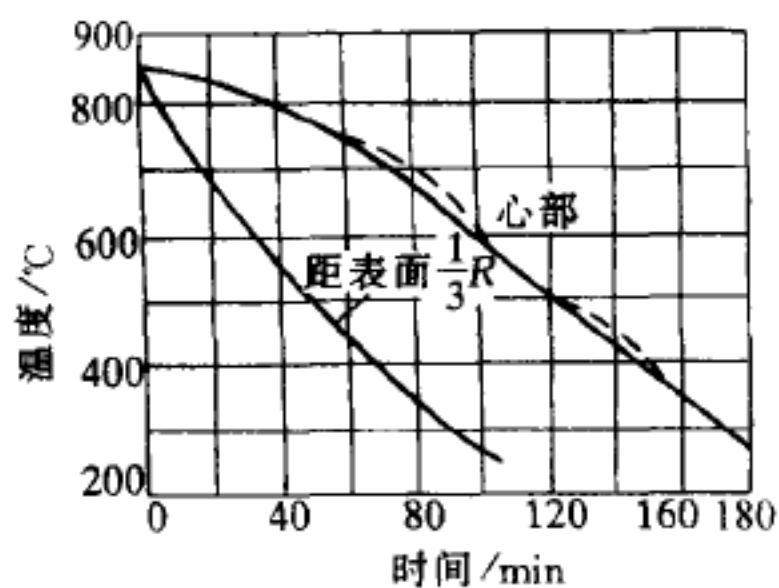


图 19-58 直径 920mm 钢坯油冷曲线

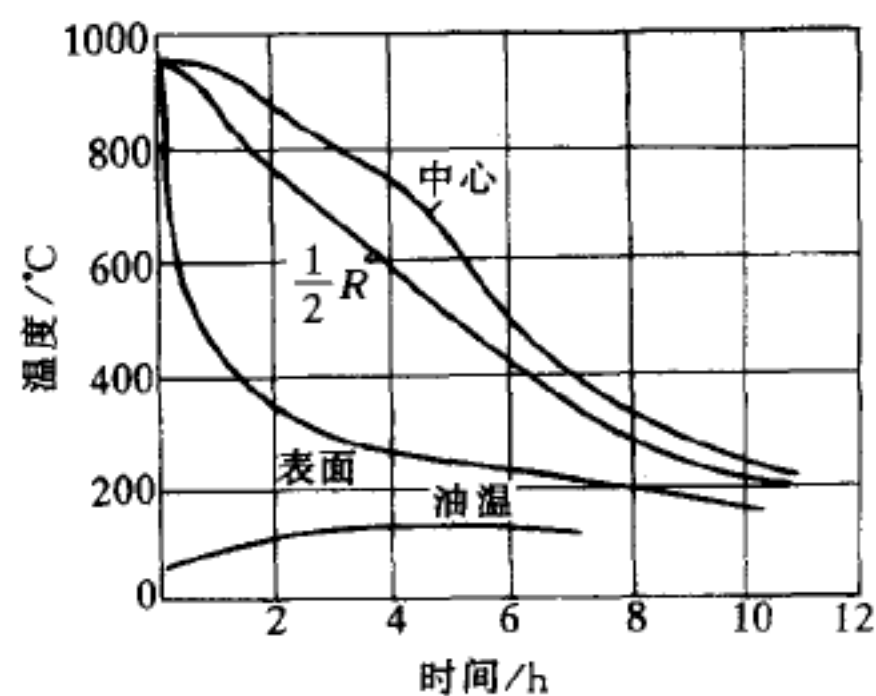


图 19-59 直径 1270mm 钢坯油冷曲线

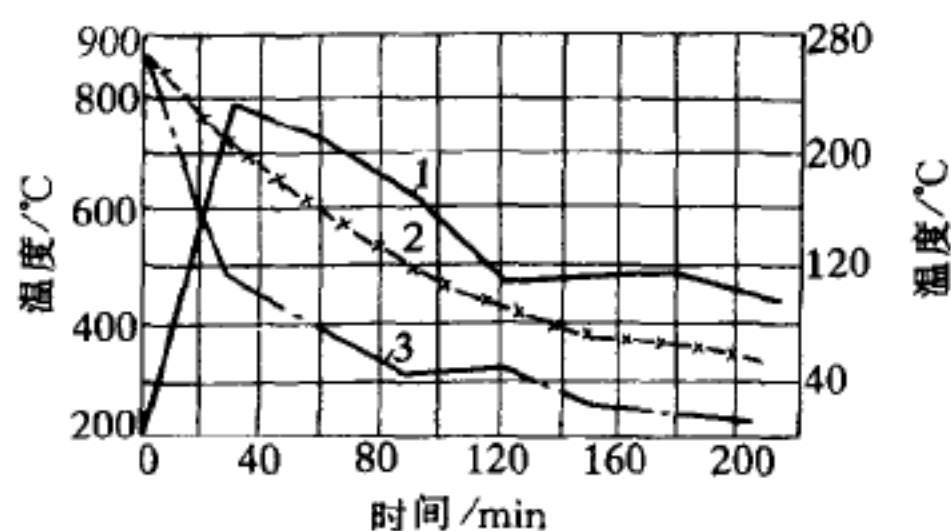


图 19-60 直径 1030mm(中心孔直径 100mm)

毛坯油冷曲线,冷却规范:

1. 在油中保持 10min, 2. 在空气中保持 10min,

然后在油中保持 86min, 送回火炉

1—表面与 $R/2$ 处温差 2— $R/2$ 3—距表面 50mm

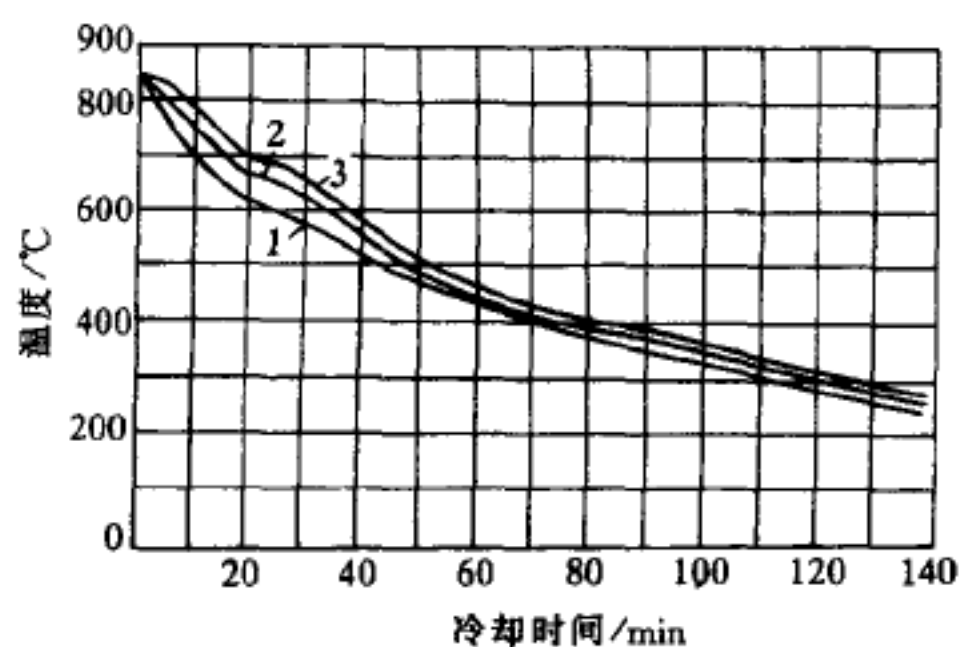


图 19-61 直径 200mm 的 40Cr2MoV 钢坯空冷曲线

1—表面 2— $R/3$ 3—中心

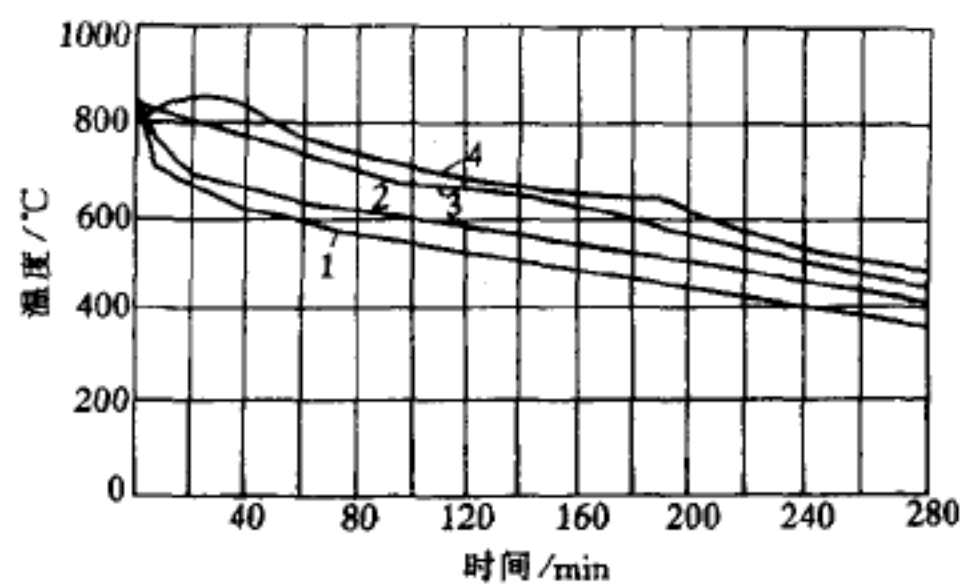


图 19-62 直径 650mm 的 45Cr 钢坯空冷曲线

(静止空气), 加热温度: 表面 900°C

距表面 1—20mm 2—50mm

3—165mm 4—325mm

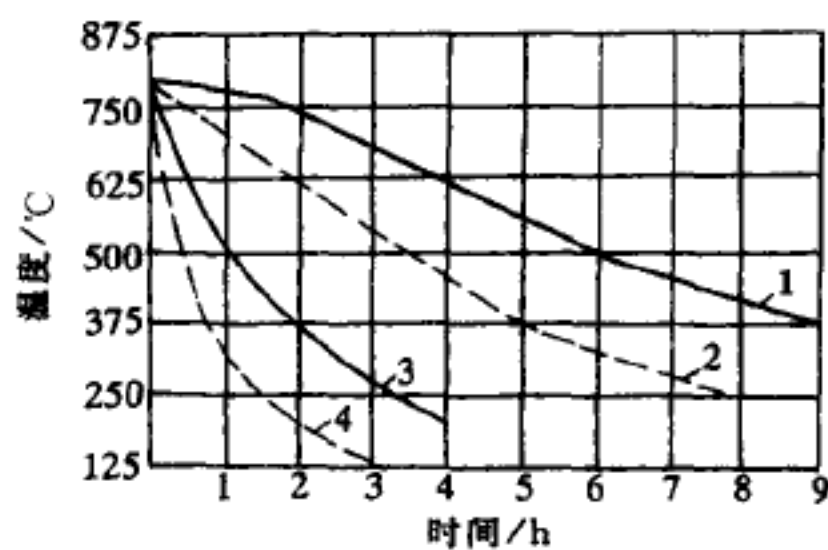


图 19-63 直径 120 ~ 920mm 工件心部冷却曲线

1—920mm 2—520mm 3—250mm

4—120mm

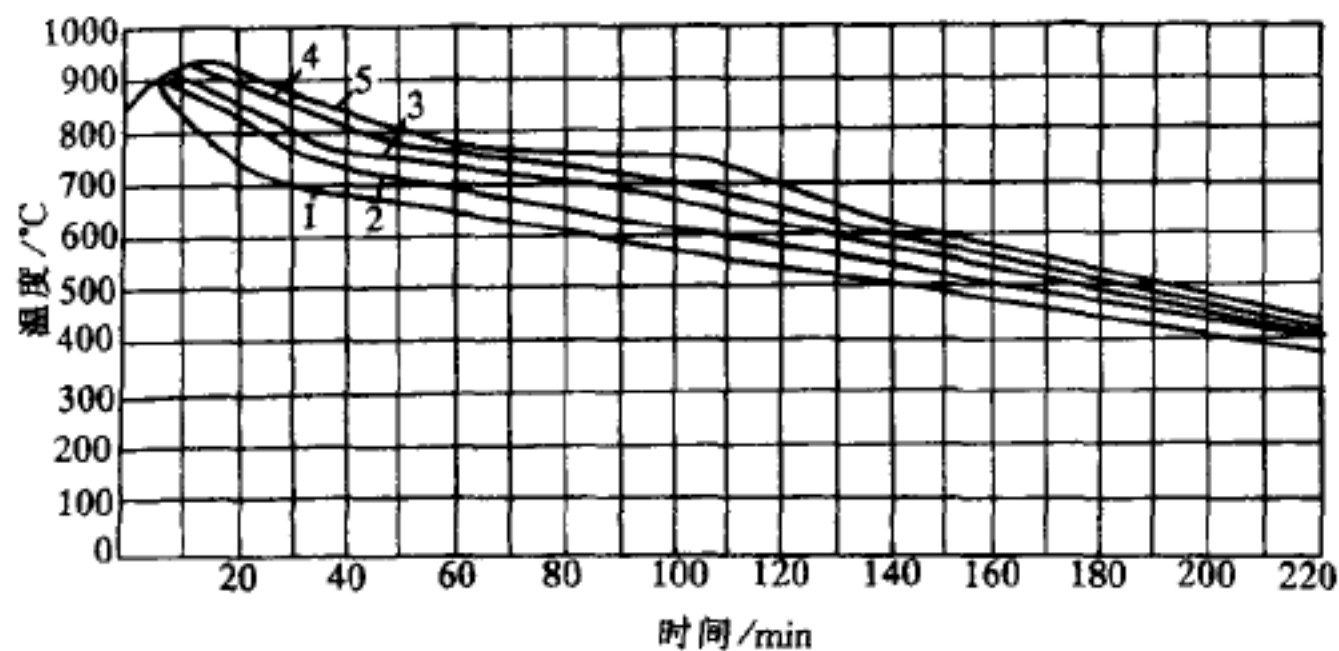


图 19-64 直径 460mm 50Mn 钢坯空冷曲线

(静止空气), 加热温度: 表面 910°C

距表面: 1—15mm 2—30mm

3—65mm 4—120mm 5—230mm

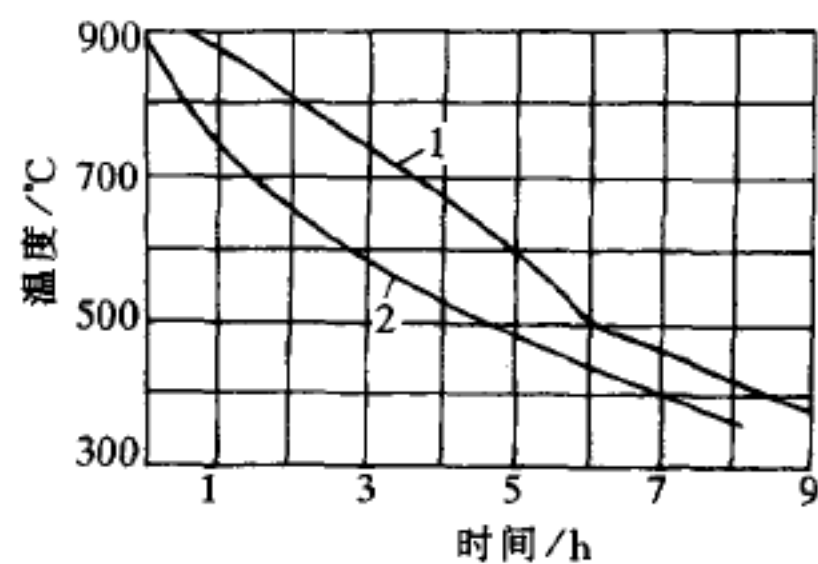


图 19-65 直径 900mm 钢坯空冷曲线

1—心部 2—距表面 $R/3$

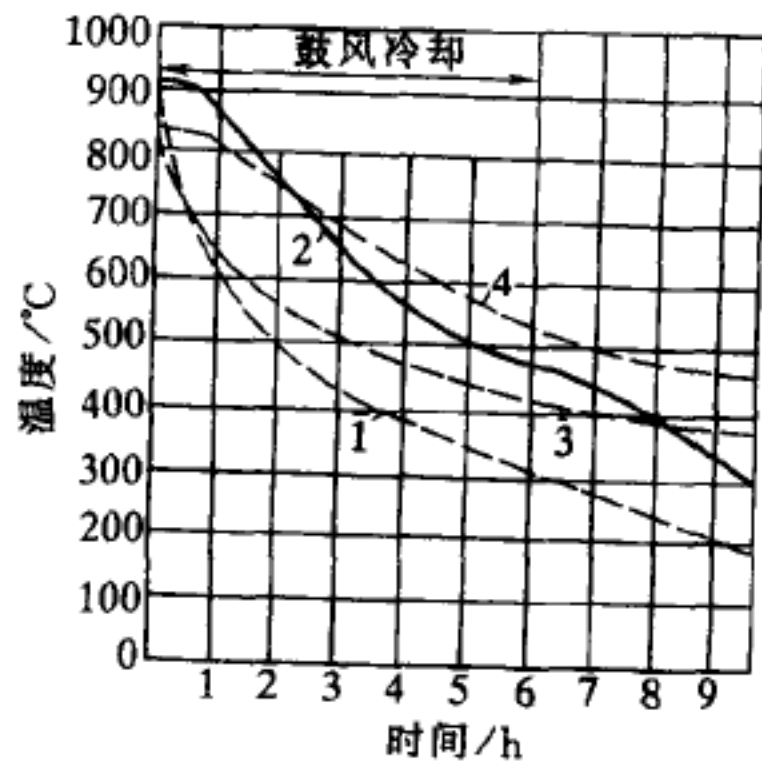


图 19-66 直径 950mm 转子空冷曲线

1、3—中心 2、4—表面 1、2—鼓
风冷 3、4—静止空冷

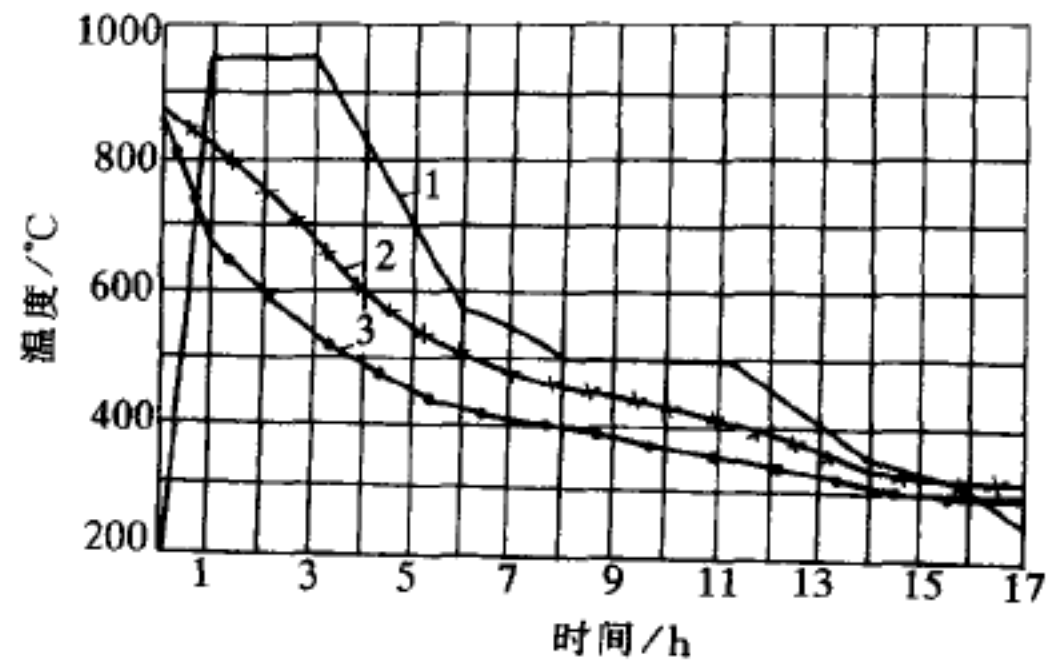


图 19-67 直径 1030mm(中心孔直径 100mm)

毛坯空冷曲线

1—表层与 $R/2$ 之间温差 2— $R/2$ 3—表层(50mm)

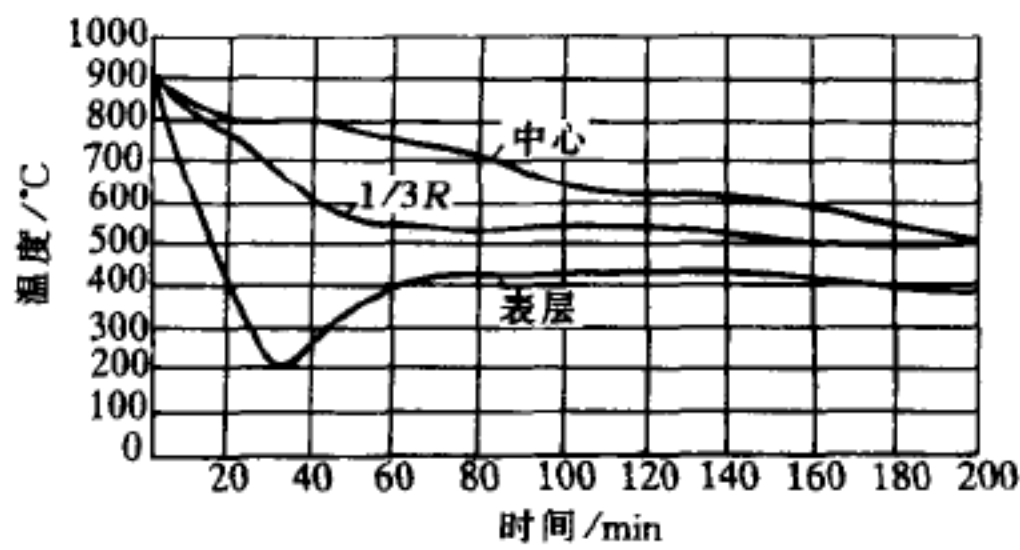


图 19-68 直径 870mm 的 34CrNiMo 钢

转子水-空冷却曲线

规范:水-空 $12'/1'39'' + 3'/$
 $2'30'' + 3'/2' + 3'/$
 $2' + 3'/2' + 240'$

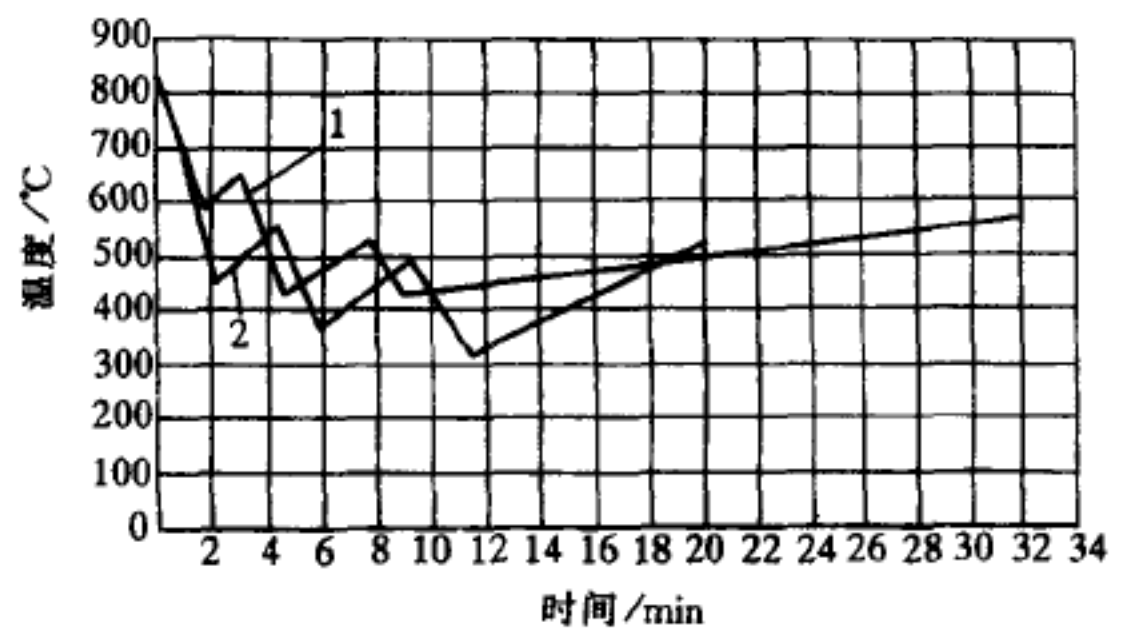
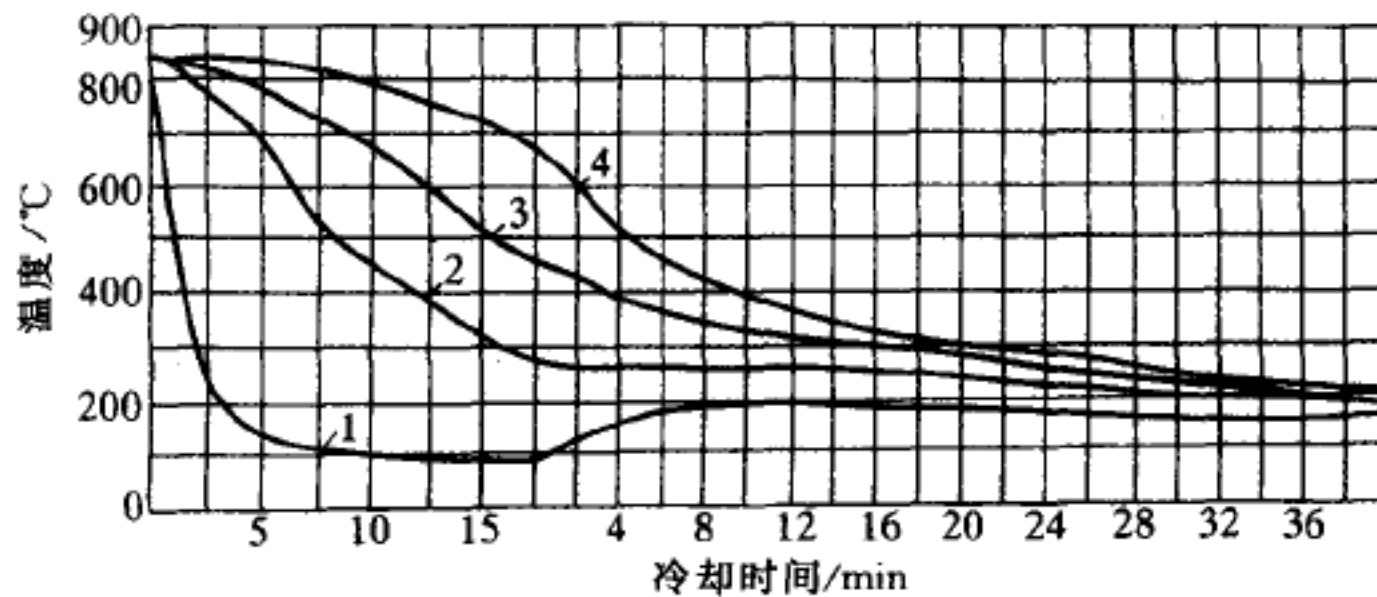


图 19-69 45、40Cr 钢轴水-空冷却

表面温度变化曲线

1—45 钢直径 300mm, 规范:水-空: $2'/1'30'' + 1'25''/3'5'' +$
 $1'/2'$ 2—40Cr 钢直径 430mm, 规范:水-空: $2'30''/1'40'' +$
 $2'/3'20'' + 1'30''/2'$ 水温 50°C



a)

b)

图 19-70 直径 400mm 40Cr 钢锻件先在水中 a),
后在油中 b) 冷却的曲线

距表面: 1—10mm 2—75mm 3—130mm 4—200mm

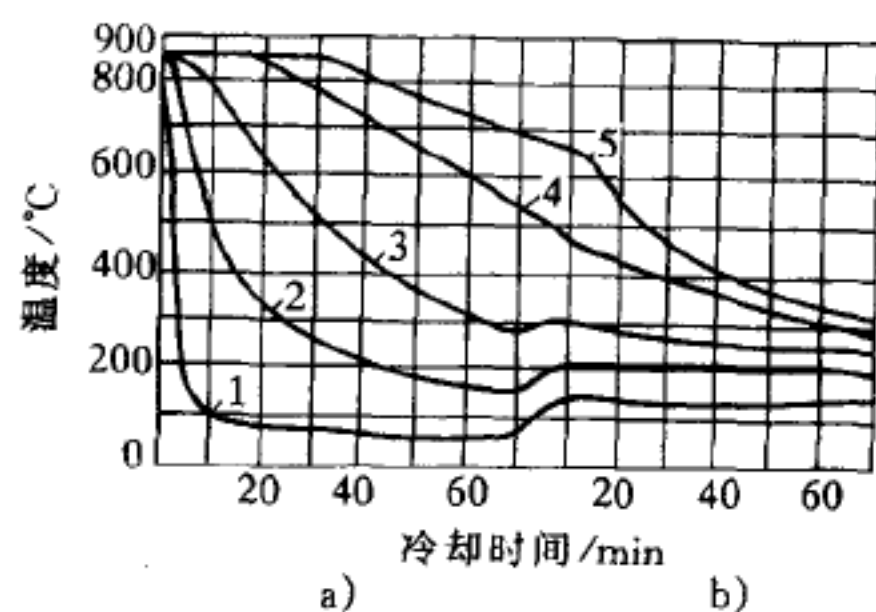


图 19-71 直径 800mm 40CrNi 钢锻件先在水中 a), 后在油中 b) 冷却曲线
距表面: 1—10mm 2—70mm 3—130mm
4—260mm 5—400mm

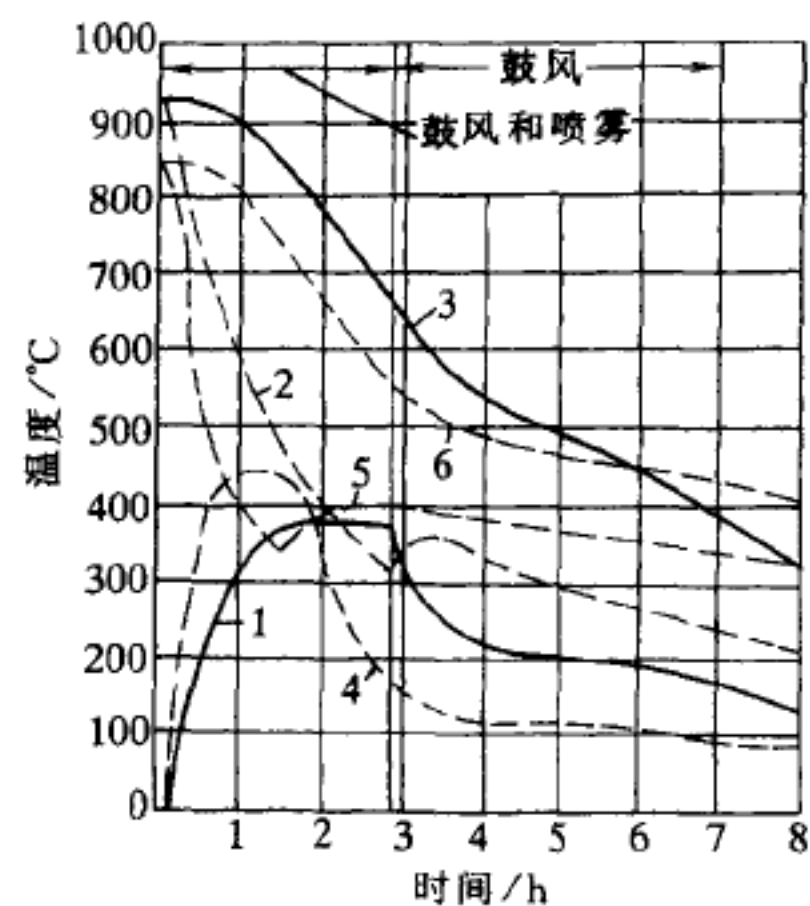


图 19-72 直径 950mm 锻件鼓风并喷雾冷却时 (1、2、3) 及油-空冷却时 (4、5、6) 的冷却曲线

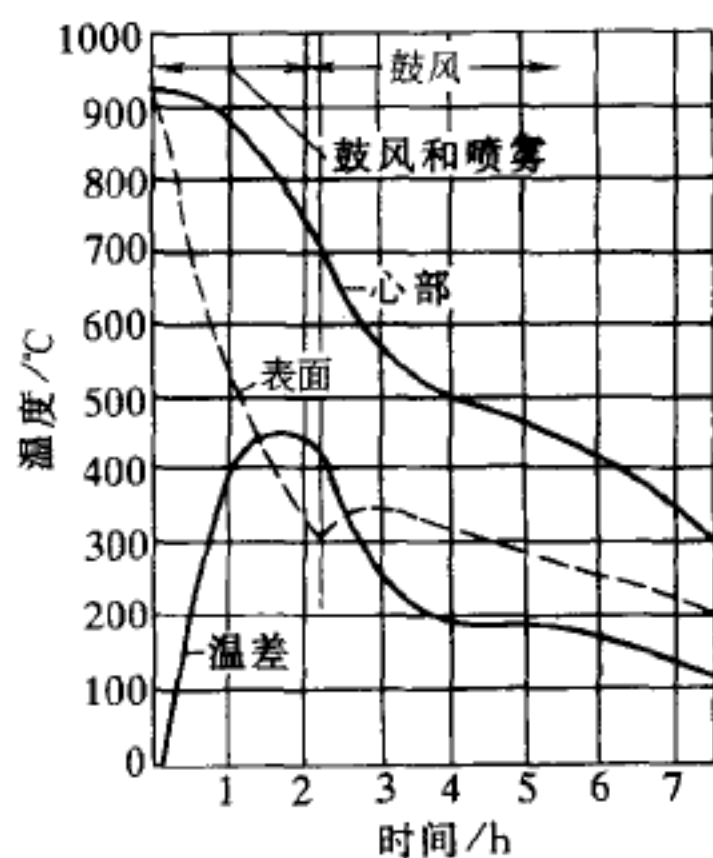


图 19-73 直径 950mm 转子鼓风和喷雾冷却曲线
0.4~0.6MPa (水压 4.6 大气压)

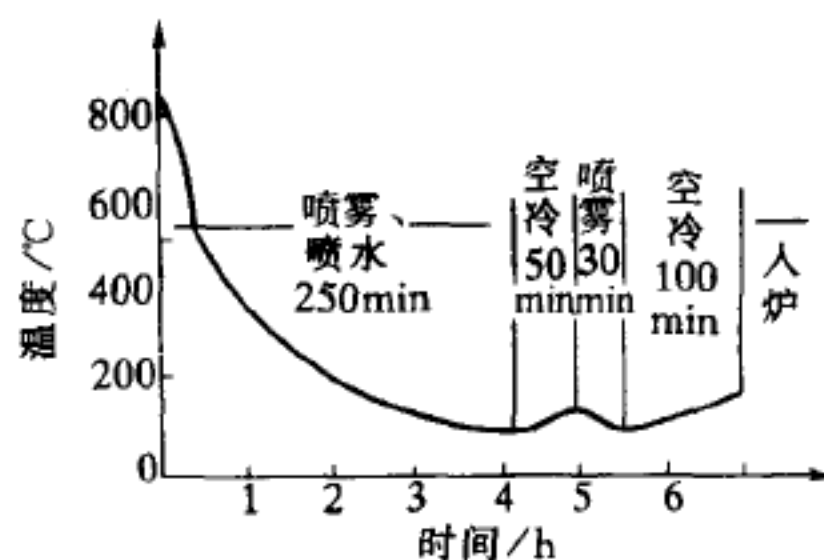


图 19-74 60 万 kW 转子喷雾
淬火冷却曲线 (轴身表面)

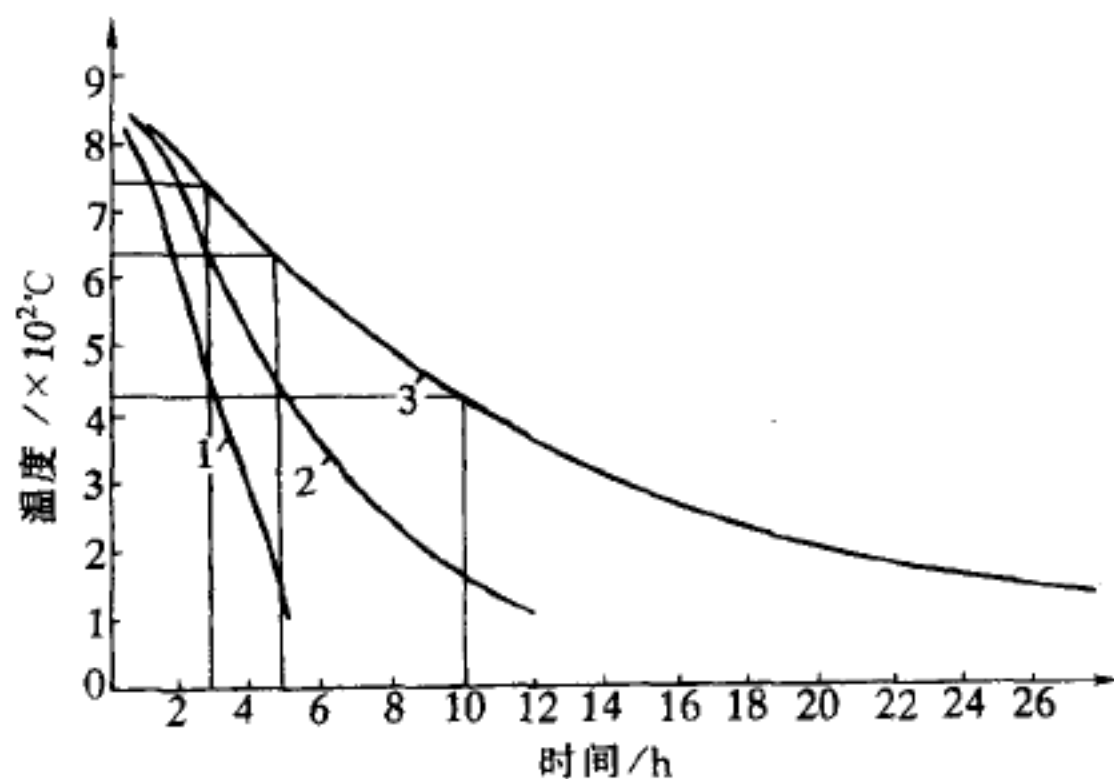


图 19-75 $\phi 1250\text{CrNiMo}$ 钢心部三种制度的冷却曲线
1—喷雾 2—油淬 3—正火

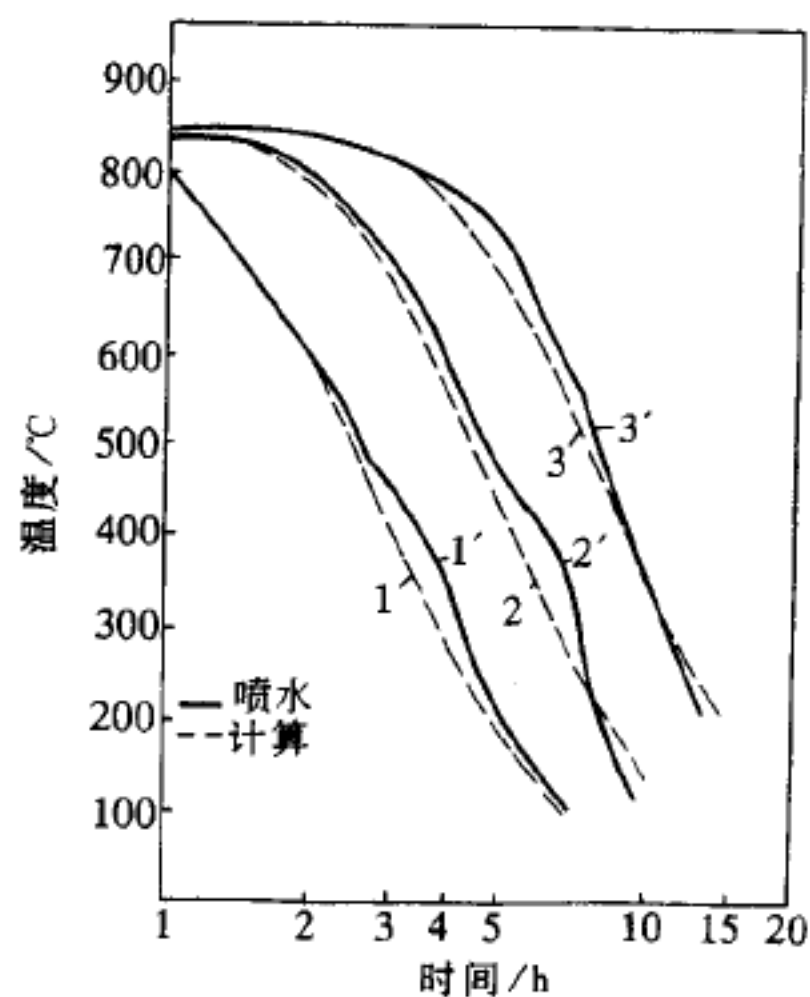
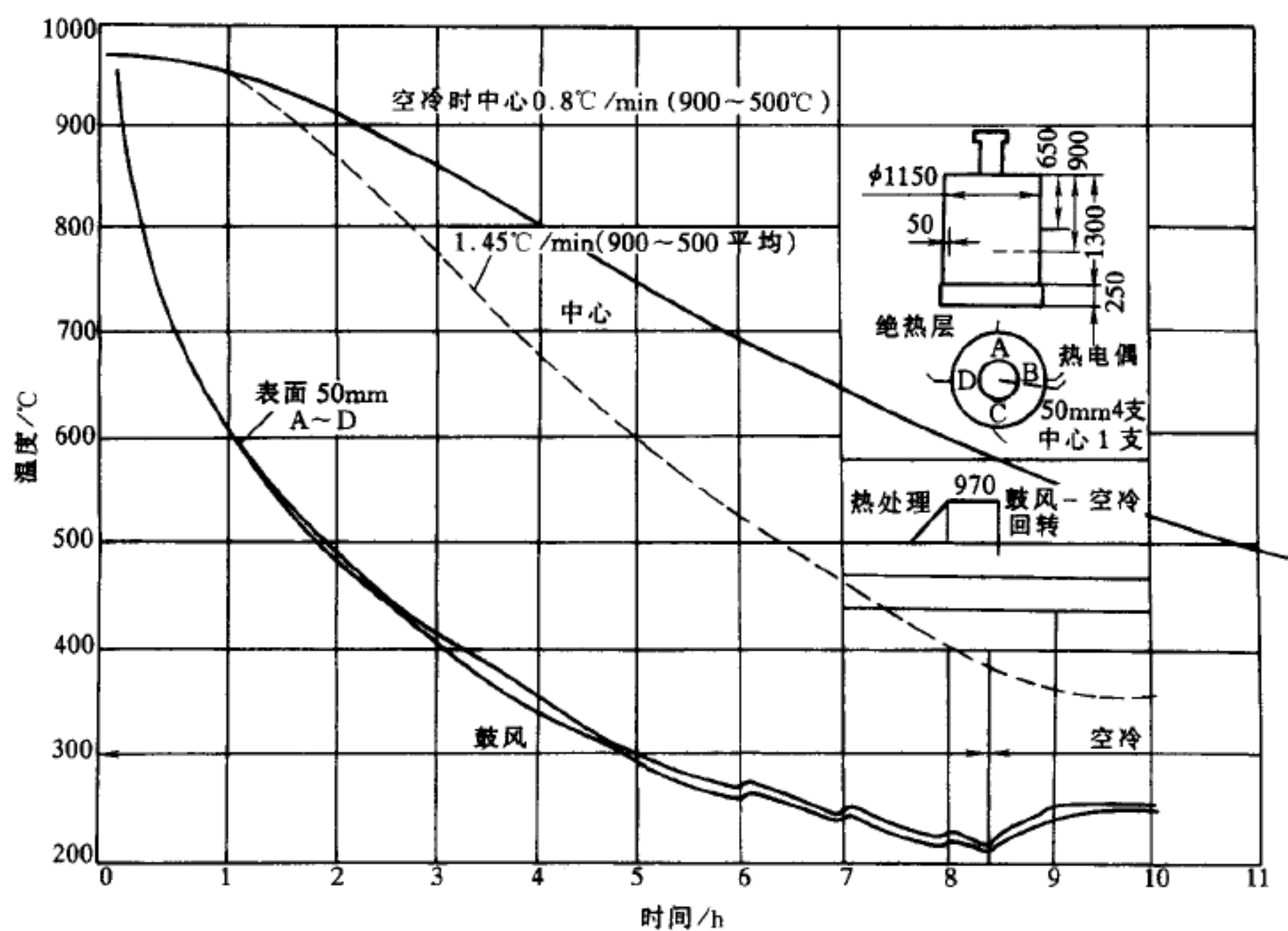


图 19-76 中心部位冷却曲线实测值与计算值的比较,喷水淬火

1— $\phi 1020\text{mm}$, 中心部(计算) 1'— $\phi 1020\text{mm}$, 中心部(喷水) 2— $\phi 1370\text{mm}$, 中心部(计算)
2'— $\phi 1370\text{mm}$, 中心部(喷水) 3— $\phi 1800\text{mm}$, 中心部(计算) 3'— $\phi 1800\text{mm}$, 中心部(喷水)

图 19-77 $\phi 1150\text{mm} 12\text{CrMoV}$ 钢鼓风冷却曲线

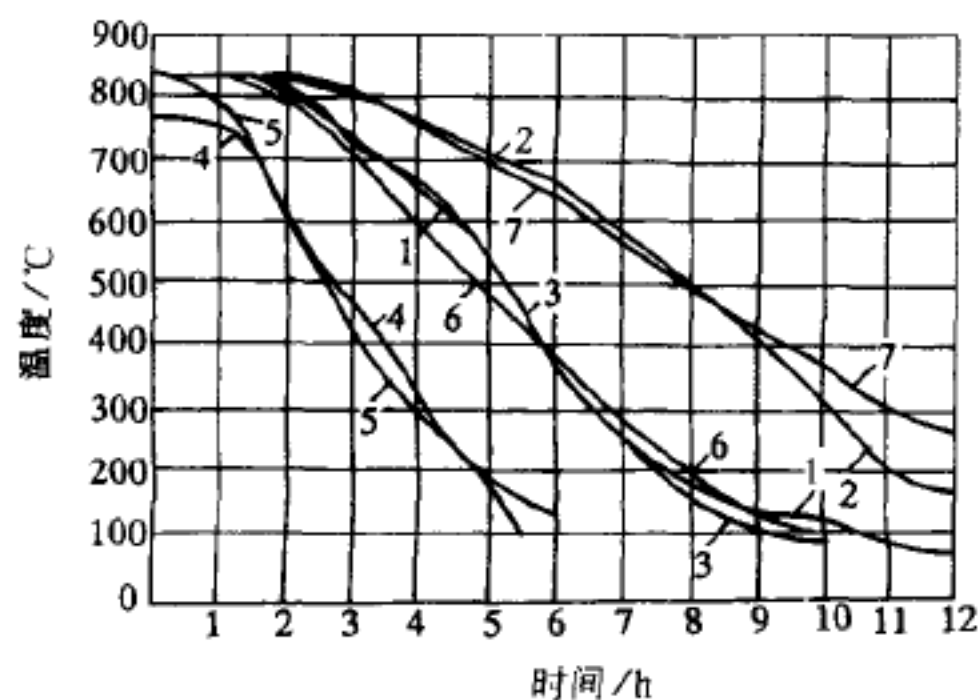


图 19-78 大型转子锻件中心的冷却曲线
1— $\phi 1470\text{mm}$ 水淬 2— $\phi 1470\text{mm}$ 吹风 3— $\phi 1470\text{mm}$ 喷水 4— $\phi 1170\text{mm}$ 水淬 5— $\phi 1020\text{mm}$ 喷水 6— $\phi 1370\text{mm}$ 水淬 7— $\phi 1800\text{mm}$ 喷水

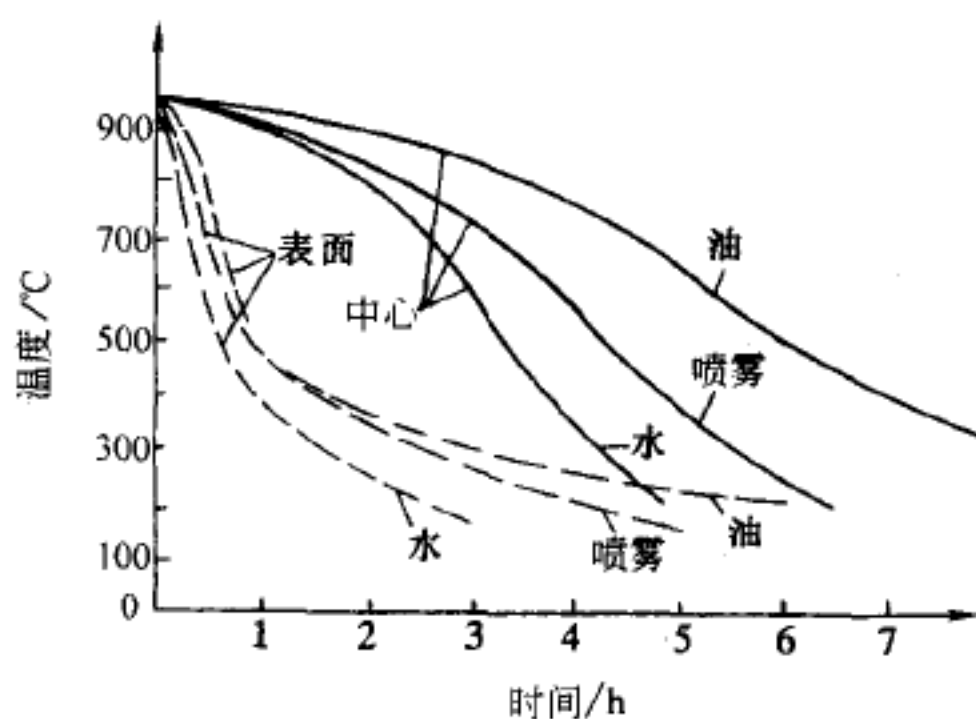


图 19-80 直径 1270mm 钢坯
喷雾、油、水冷却曲线

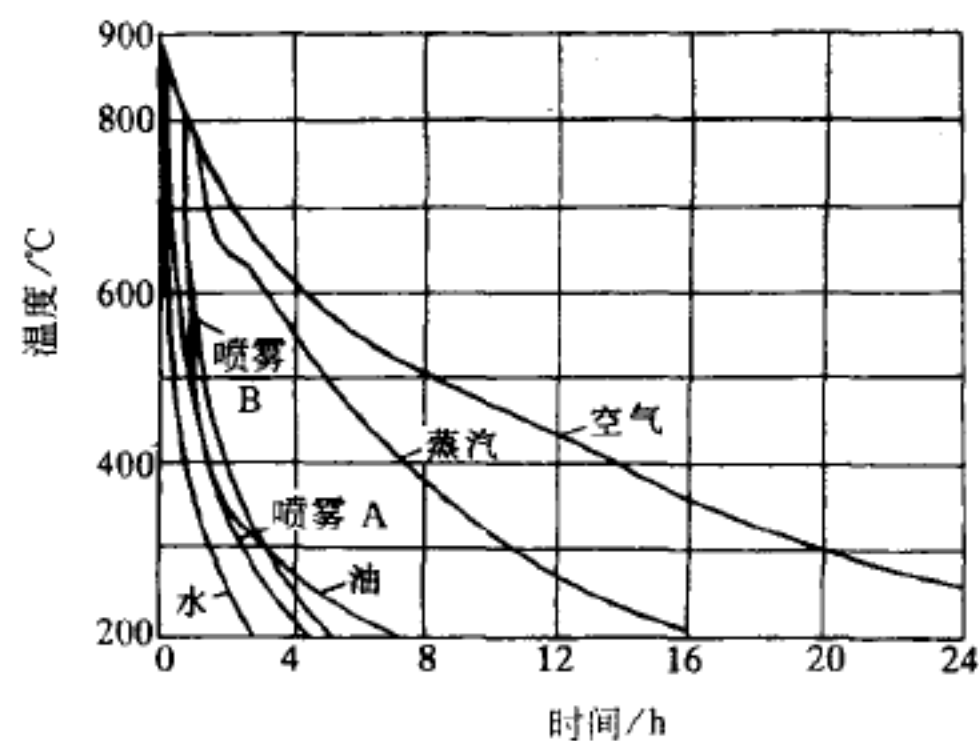


图 19-82 直径 1270mm 锻件表层冷却速度

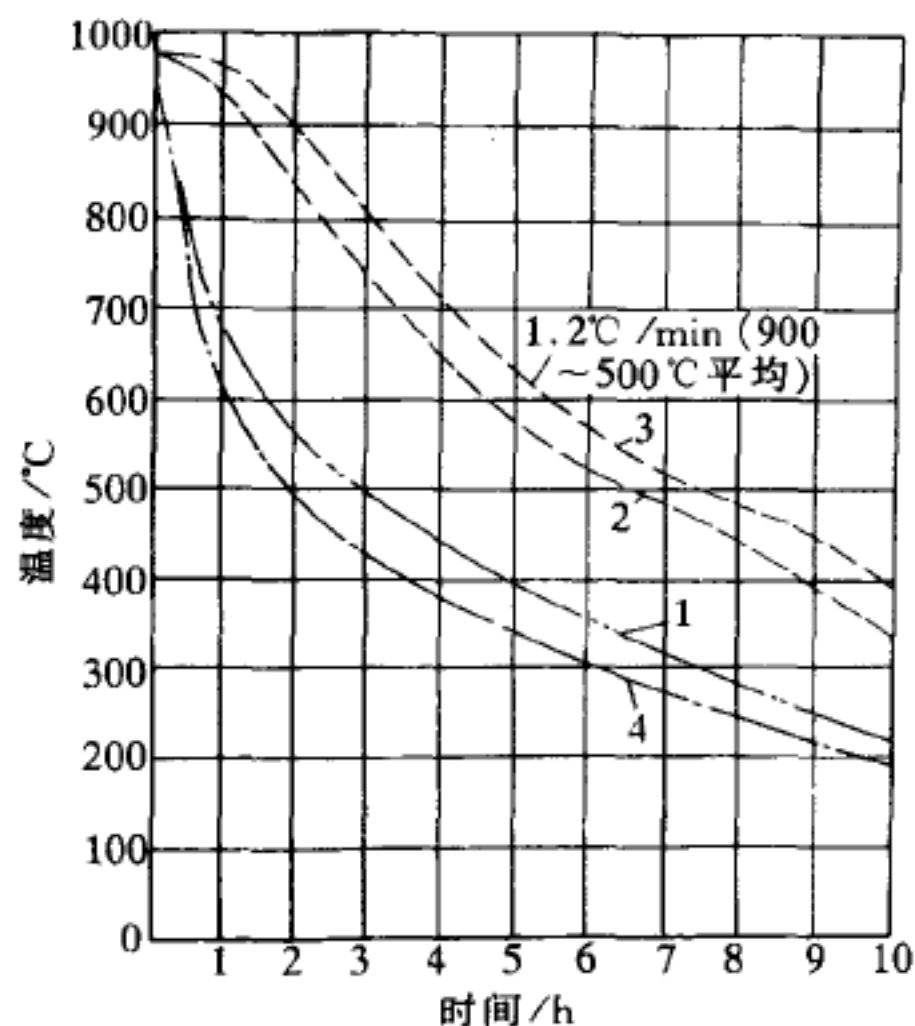


图 19-79 从淬火温度开始各部位的冷却曲线,
 $\phi 1300\text{mm}$, CrMoV 钢
1、4—表层 2— $R/2$ 3—心部

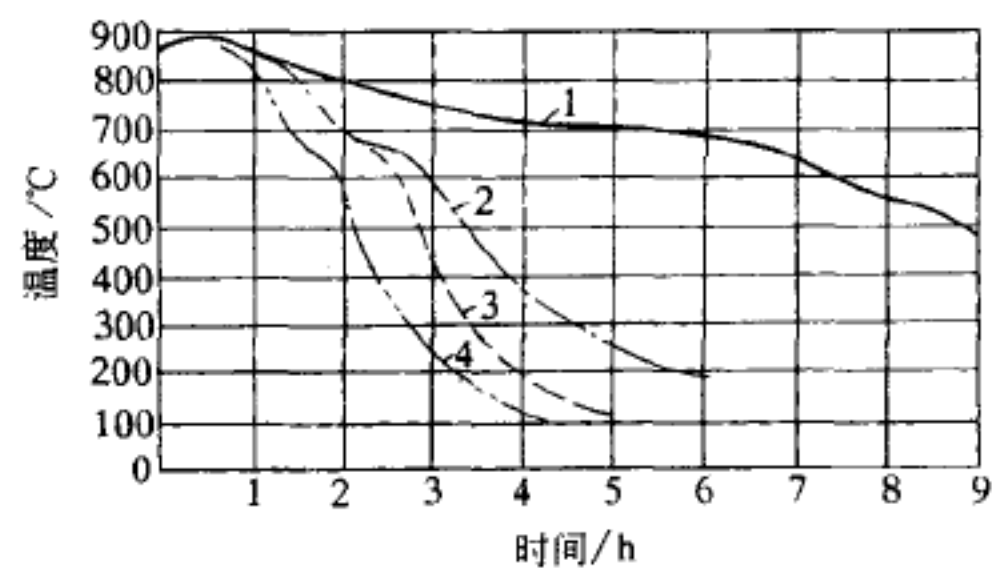


图 19-81 直径 930mm 圆柱在不同冷却介
质中的心部冷却曲线

1—静止空气 2—油冷 3—鼓风和喷雾 4—水冷

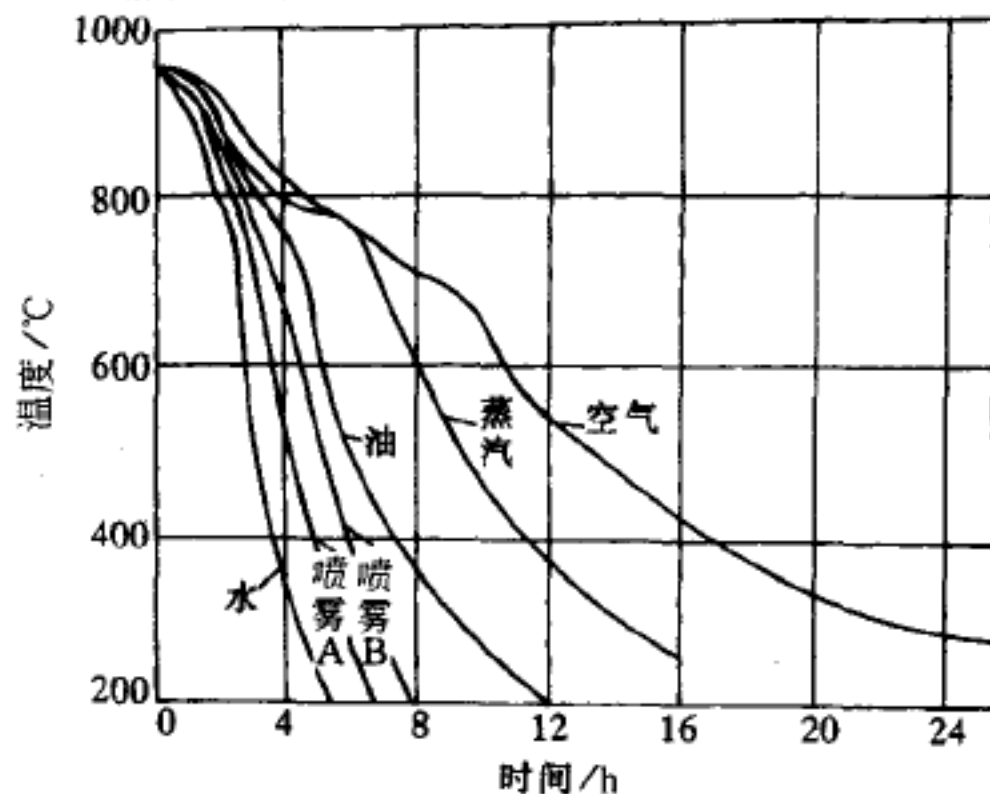


图 19-83 直径 1270mm 钢坯心部冷却曲线

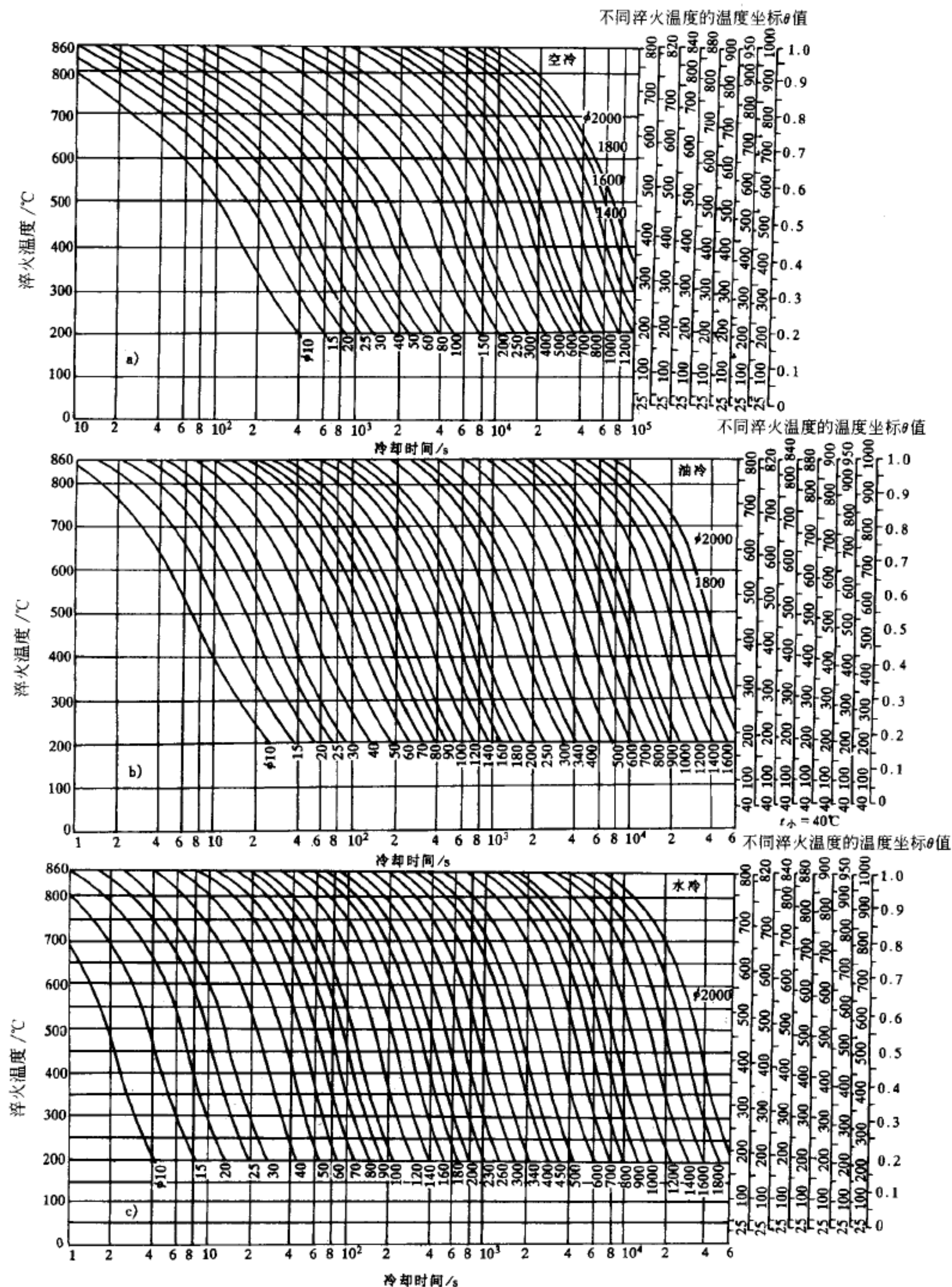


图 19-84 圆柱形工件中心的冷却曲线实测得到平均值

(λ 经过 $\theta = \frac{t - t_{\text{介}}}{t_{\text{淬}} - t_{\text{介}}}$ 换算求出, 取 $t_{\text{介}}$ 为 25°C (空、水) 和 40°C (油))

a) 空冷 b) 油冷 c) 水冷

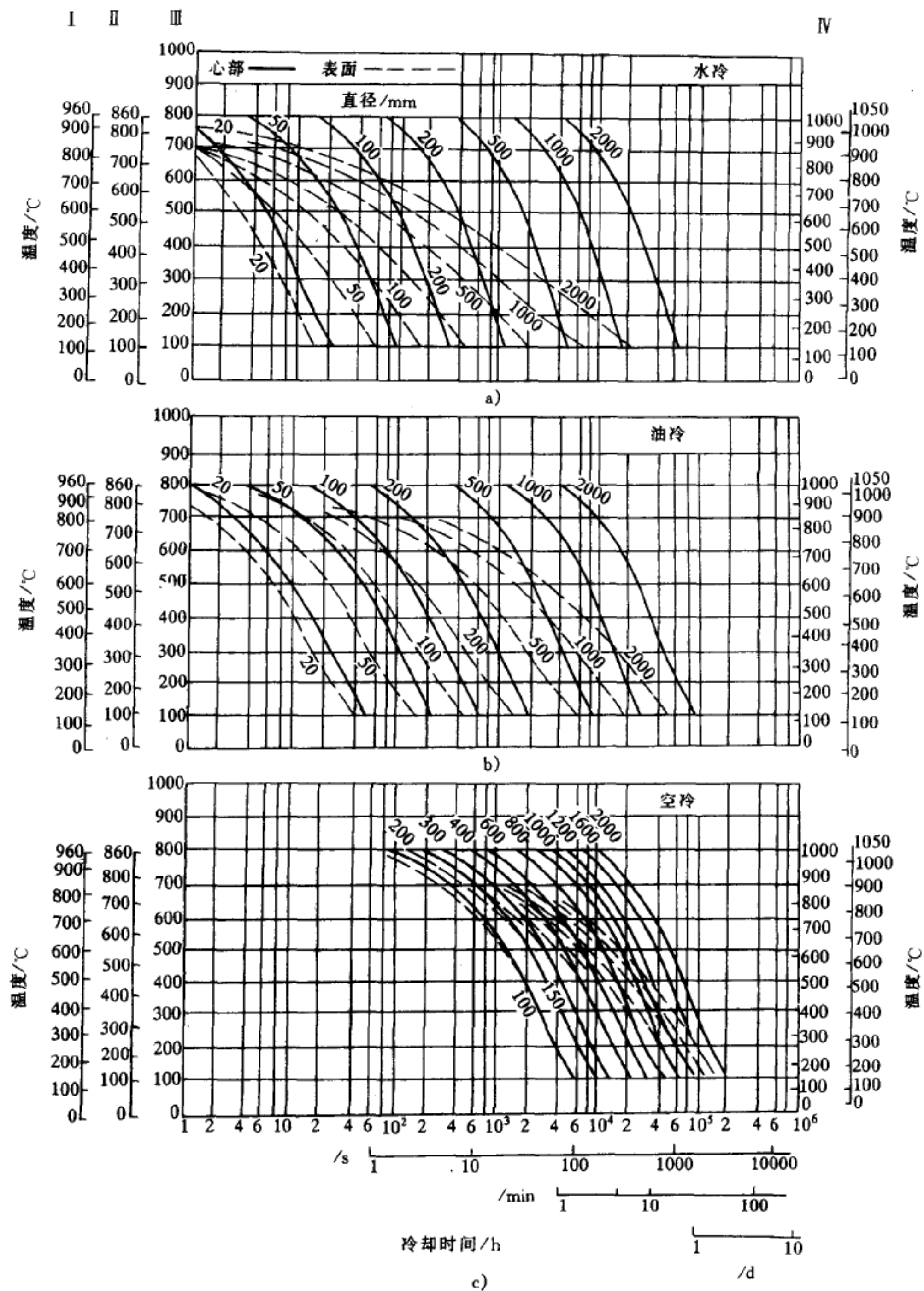


图 19-85 不同直径圆棒分别水冷、油冷和空冷时的表面和心部的冷却曲线(由计算值经实测值修正后做出)

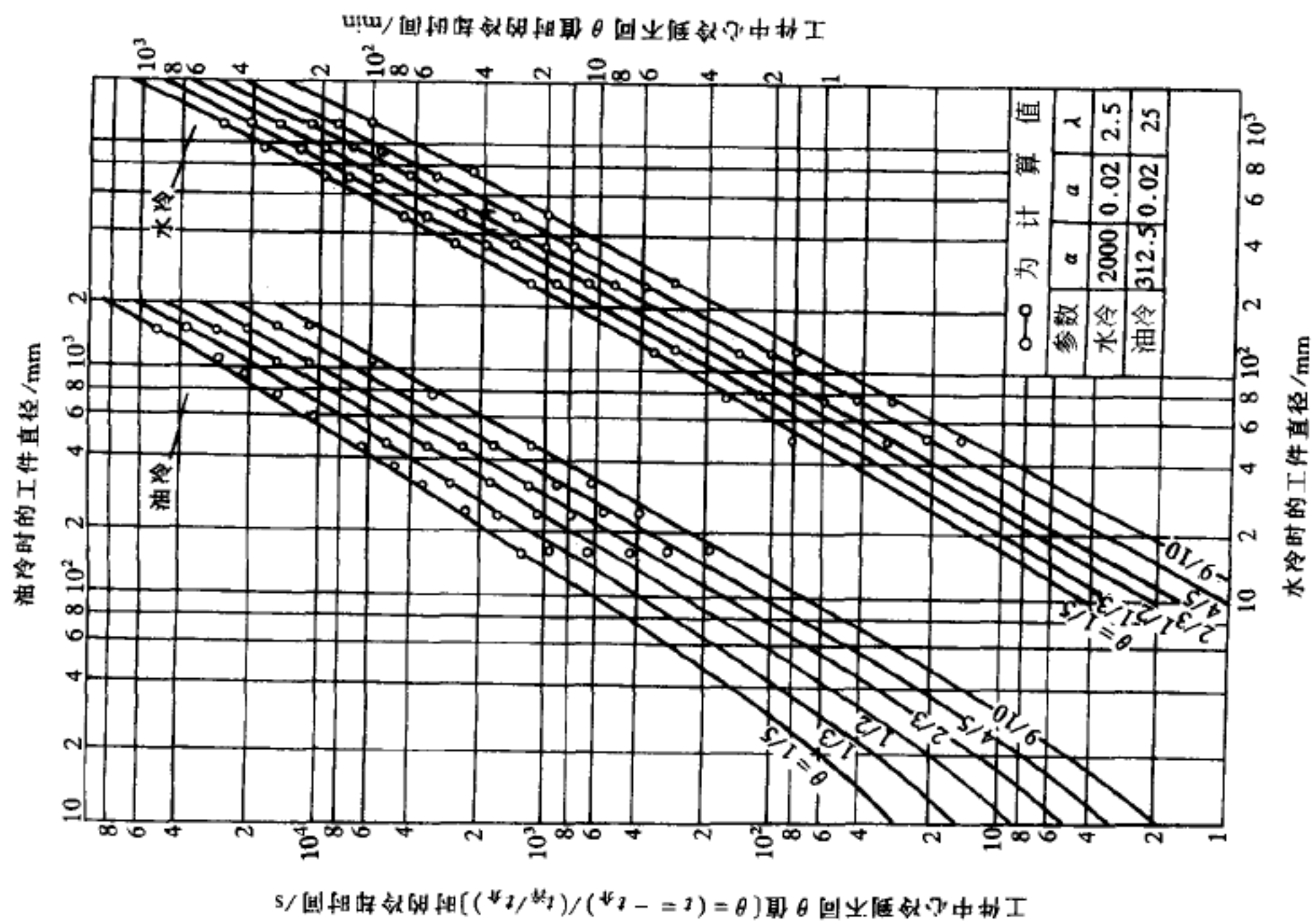


图 19-87 圆柱形工件中心油冷及水冷到不同 θ 值($\theta = \frac{t - t_{\text{介}}}{t_{\text{终}} - t_{\text{介}}}$)

时冷却时间与工件直径的关系
(图上的实线为实测平均值)

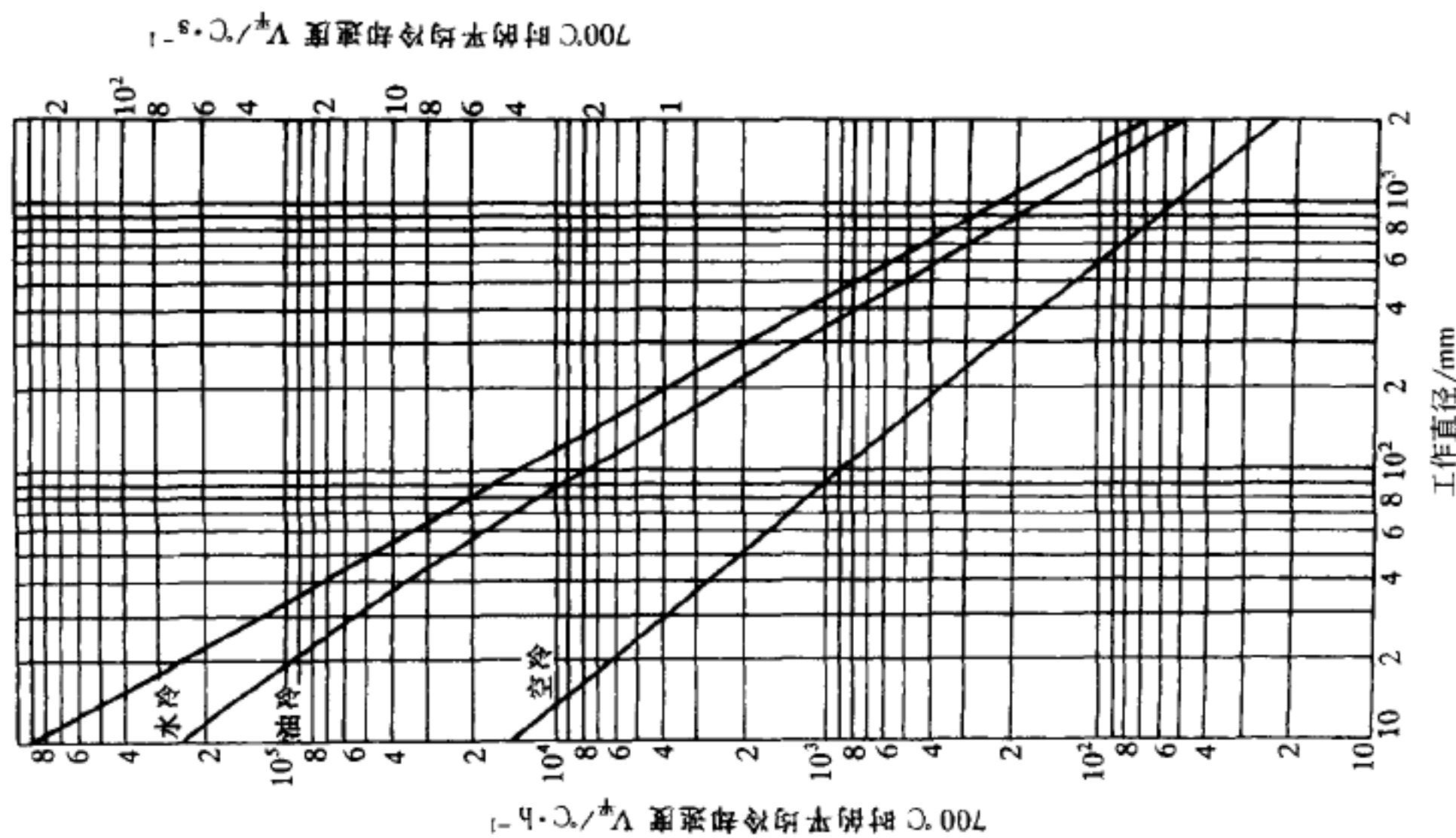


图 19-86 700℃时的平均冷却速度
与工件直径的关系

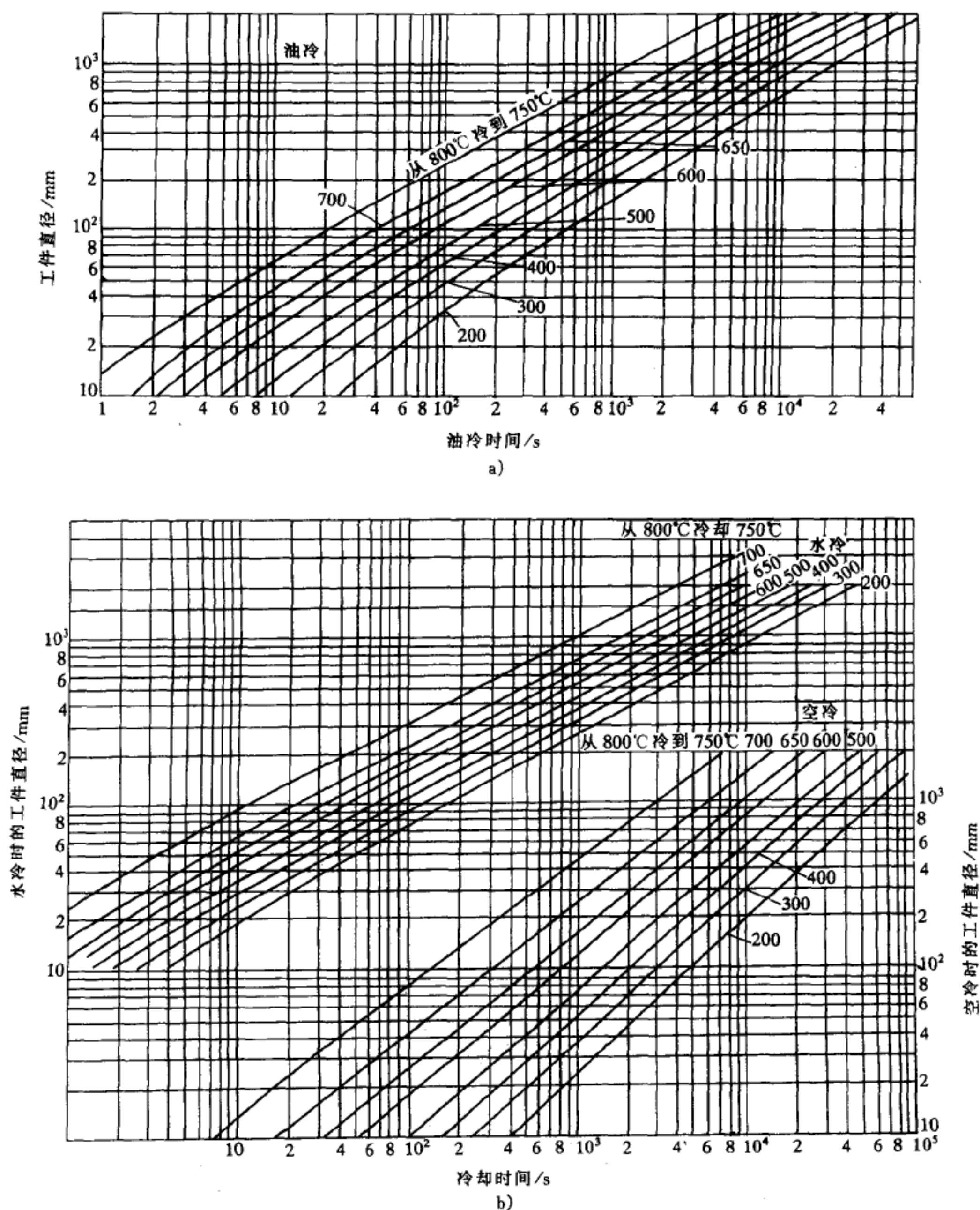


图 19-88 工件中心以 800°C 冷却到不同温度时冷却时间与工件直径的关系

a) 油冷 b) 水冷和空冷

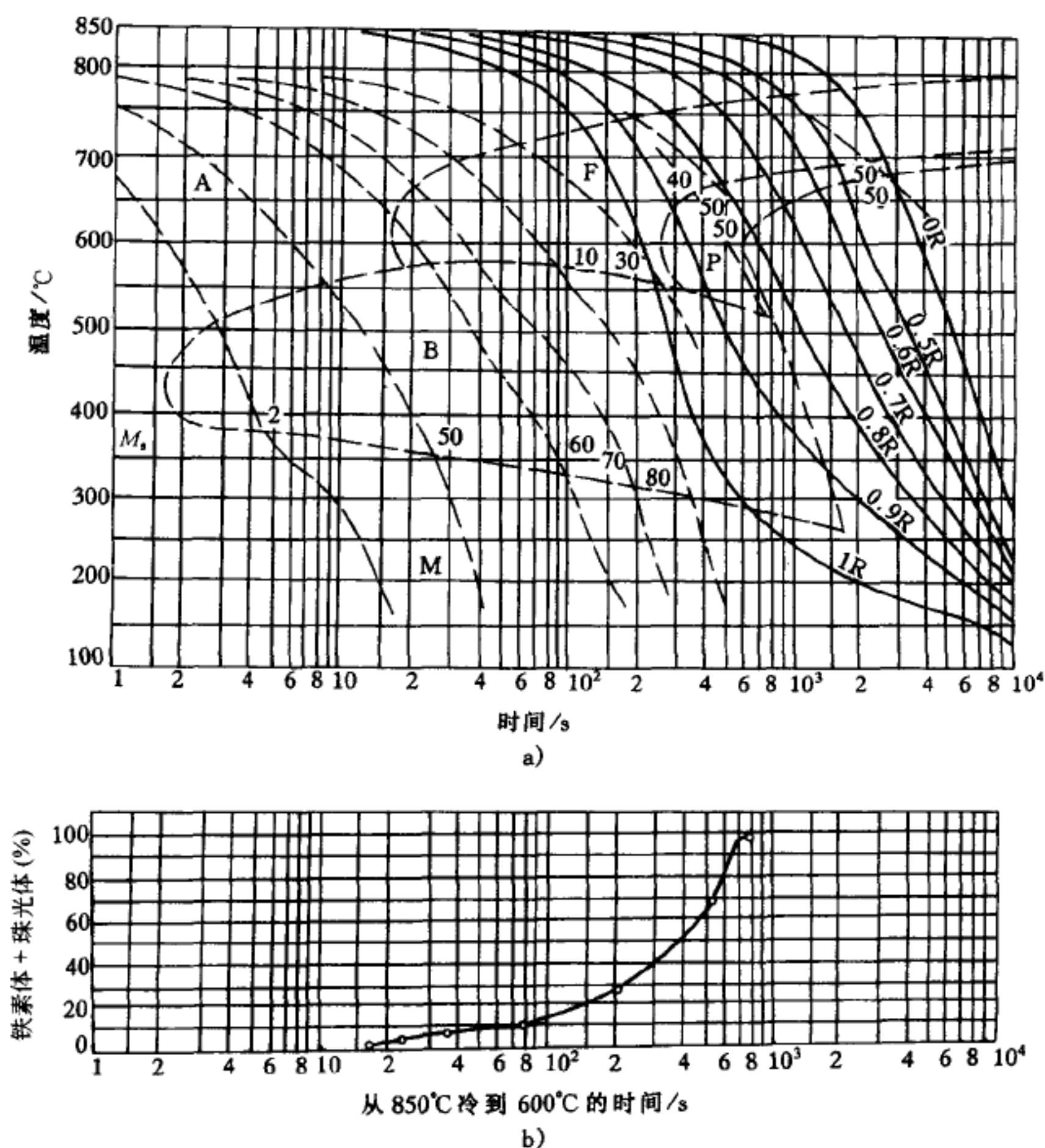


图 19-89 30CrMo 钢的连续冷却曲线和冷却后组织与冷却时间的关系

a) 30CrMo 钢的连续冷却转变曲线(虚线)和直径为 600mm 的工件的不同部位油冷曲线

b) 连续冷却转变曲线上各冷却曲线冷却后的组织与对应的 850℃ 到 600℃ 的冷却时间的关系

(38CrMo: $w_C 0.3\%$, $w_{Si} 0.22\%$, $w_{Mn} 0.84\%$, $w_{Cr} 1.01\%$, $w_{Mo} 0.24\%$)

(3) 力学性能(表 19-11 ~ 表 19-13)

表 19-11 优质碳素钢锻件热处理后的力学性能

钢号	截面尺寸/mm	试样方向	试验状态	力学性能						热处理		
				σ_b / MPa \geq	σ_s / MPa \geq	δ_5 (%) \geq	ψ (%) \geq	a_K [J· cm ⁻²] \geq	HBW	类型	温度/℃	冷却
15	≤ 100	纵向	正火	350	200	27	55	65	99 ~ 143	正火	900 ~ 920	空
	> 100 ~ 300		正火、正火 + 回火	340	170	25	50	60		回火	600 ~ 680	空、炉
	> 300 ~ 500		正火 + 回火	330	150	24	45	55				
20	≤ 100	纵向	正火	400	220	24	53	60	103 ~ 156	正火	880 ~ 900	空
	> 100 ~ 300		正火、正火 + 回火	380	200	23	50	60		回火	600 ~ 650	空、炉
	> 300 ~ 500		正火 + 回火	370	190	22	45	60				
	> 500 ~ 700		正火 + 回火	360	180	20	40	50				

(续)

钢号	截面尺寸 /mm	试样 方向	试验状态	力学性能						热处理		
				σ_b / MPa \geq	σ_s / MPa \geq	δ_5 (%) \geq	ψ (%) \geq	a_K /J· cm ⁻² \geq	HBW	类型	温度 /℃	冷却
25	≤ 100	纵向	正火	430	240	22	50	50	110 ~ 170	正火	870 ~ 890	空
	> 100 ~ 300		正火、正火 + 回火	400	220	20	48	40				
	> 300 ~ 500		正火 + 回火	390	210	18	40	40				
	> 500 ~ 750											
30	≤ 100	纵向	正火	480	250	19	48	40	126 ~ 179	正火	860 ~ 880	空
	> 100 ~ 300		正火、正火 + 回火	470	240	19	46	35				
	> 300 ~ 500		正火 + 回火	460	230	18	40	35				
	> 500 ~ 750			450	220	17	35	30				
35	≤ 100	纵向	正火	520	270	18	43	35	128 ~ 187	正火	860 ~ 880	空
	> 100 ~ 300		正火、正火 + 回火	500	260	18	40	30				
	> 300 ~ 500		正火 + 回火	480	240	17	37	30				
	> 500 ~ 750			460	230	16	32	25				
	≤ 100		淬火 + 回火	560	300	19	48	60	≤ 207	淬火	860 ~ 880	水、油
	> 100 ~ 300			540	280	18	40	50				
40	≤ 100	纵向	正火	560	280	17	40	30	≤ 207	正火	840 ~ 860	空
	> 100 ~ 300		正火、正火 + 回火	540	270	17	36	30				
	> 300 ~ 500		正火 + 回火	520	260	16	32	25				
	> 500 ~ 750			500	250	15	30	25				
	≤ 100		淬火 + 回火	630	350	18	40	50	170 ~ 217	淬火	830 ~ 850	水
	> 100 ~ 300			600	300	17	35	40				
45	≤ 100	纵向	正火	600	300	15	38	30	≤ 207	正火	830 ~ 860	空
	> 100 ~ 300		正火、正火 + 回火	580	290	15	35	25				
	> 300 ~ 500		正火 + 回火	560	280	14	32	25				
	> 500 ~ 750			540	270	13	30	20				
	≤ 200		淬火 + 回火	650	360	17	35	40	187 ~ 229	淬火	820 ~ 850	水、油
50	≤ 100	纵向	正火	620	320	13	35	30	≤ 229	正火	830 ~ 860	空
	> 100 ~ 300		正火、正火 + 回火	600	300	12	33	25				
	> 300 ~ 500		正火 + 回火	580	290	12	30	25				
	> 500 ~ 750			560	270	12	28	20				
60	≤ 100	纵向	正火 + 回火	700	400	13	34	25	≤ 241			
	> 100 ~ 300			660	360	12	32	20				
50Mn	≤ 300	纵向	正火 + 回火	660	330	10	25	30	175 ~ 228	正火	800 ~ 820	空
50Mn	≤ 100	纵向	正火 + 回火	650	340	13	35		≤ 255	正火	820 ~ 840	空
	> 100 ~ 300			620	320	12	33					
	≤ 60			800	550	8	40	35				
	> 60 ~ 100		淬火 + 回火	780	500	7	35	30				

表 19-12 合金结构钢锻件热处理后的力学性能

钢 号	截面尺寸 /mm	试样 方向	试验状态	力 学 性 能						热 处 理		
				σ_b / MPa \geq	σ_s / MPa \geq	δ_5 (%) \geq	φ (%) \geq	a_K /J· cm ⁻² \geq	HBW	类型	温度 /℃	冷却
30Mn2	≤ 100 > 100 ~ 300	纵向	正火	600 560	300 280	20 15	50 48	80 60	≤ 241	正火	840 ~ 860	空
35Mn2	≤ 100	纵向	正火	630	320	18	45		≤ 241	正火	840 ~ 860	空
	> 100 ~ 300		正火 + 回火	590	300	18	43	30	回火	600 ~ 650	空, 炉	
	≤ 60 > 60 ~ 100 > 100 ~ 300		淬火 + 回火	800 760 700	650 600 500	16 16 16	50 50 45	60 60 60	229 ~ 255	淬火 回火	800 ~ 820 620 ~ 640	水 水
45Mn2	≤ 100 > 100 ~ 300 ≤ 60	纵向	正火	700	360	16	38		≤ 241	正火	830 ~ 850	空
	> 100 ~ 300		正火、正火 + 回火	680	340	15	35	回火		590 ~ 650	空、炉	
	≤ 60		淬火 + 回火	850	700	15	45	淬火 回火		830 ~ 850 550 ~ 650	油 水	
50Mn2	≤ 100 > 100 ~ 300 > 300 ~ 500	纵向	正火	750	400	14	35		187 ~ 241	正火	820 ~ 840	空
	> 100 ~ 300		正火、正火 + 回火	730	380	13	33	回火		590 ~ 650	空, 炉	
	> 300 ~ 500		正火 + 回火	700	360	12	30					
20MnMo	≤ 150 100 ~ 300	切向	正火 + 回火	480	270	14	40	50	179 ~ 217	正火	900 ~ 920	空
	100 ~ 300		淬火 + 回火	510	310	14	40	50	197 ~ 228	回火 淬火	580 ~ 600 890 ~ 910	水, 水 + 油
				回火					580 ~ 600		空	
22MnMo (20MnMo1)	≤ 130	切向	正火 + 回火	500	300	15	40	50	145 ~ 190	正火	860 ~ 880	空
			回火					590 ~ 610	空, 炉			
15MnMoNb	≤ 115 ≤ 300 301 ~ 500 501 ~ 800	切向	正火 + 回火	600	450	16	40	70	187 ~ 228	正火	940 ~ 960	空
	301 ~ 500 501 ~ 800		淬火 + 回火	650 600 550	500 450 400	16 16 15	40 40 35	70 60 50		回火 淬火 回火	630 ~ 650 910 ~ 930 600 ~ 620	空, 炉 油, 水 + 油 空, 炉
20SiMn	≤ 120 > 120 ~ 250 > 250 ~ 400	纵向	正火 + 回火	550 540 500	340 320 280	32 30 16	72 68 35	80 80 60		正火	930 ~ 950	空
	> 120 ~ 250		回火					560 ~ 610	空, 炉			
	> 250 ~ 400											
35SiMn	≤ 100 > 100 ~ 300 > 300 ~ 400 > 400 ~ 500	纵向	淬火 + 回火	850 750 700 680	550 450 400 380	15 14 13 11	45 35 30 28	60 50 40 40	228 ~ 269 217 ~ 269 217 ~ 255 197 ~ 255	淬火	870 ~ 900	油 水 + 油
	> 300 ~ 400		回火					580 ~ 600	油、炉			
	> 400 ~ 500											
55Si2MnV	≤ 100	纵向	淬火 + 回火	950	800	12	40	50	241 ~ 286	淬火 回火	850 ~ 870 620 ~ 640	油 空
40Cr	≤ 100 > 100 ~ 200 > 200 ~ 300 > 300 ~ 500 > 500 ~ 800	纵向	淬火 + 回火	750 750 700 630 600	520 500 450 380 350	15 14 13 10 8	45 42 40 35 30	60 50 40 30 25	≤ 285 ≤ 269 ≤ 255	淬火	840 ~ 860	水、油
	> 200 ~ 300		回火					540 ~ 580	空			
	> 300 ~ 500											
	> 500 ~ 800											
35CrMo	≤ 100 > 100 ~ 300 > 300 ~ 500 > 500 ~ 800	纵向	淬火 + 回火	750 700 650 600	550 500 450 400	15 15 15 12	45 45 35 30	60 50 40 30	228 ~ 269 217 ~ 255	淬火	840 ~ 860	油
	> 300 ~ 500		回火					600 ~ 620	空			
	> 500 ~ 800											
34CrMo1	≤ 1000	纵向	正火 + 回火	580	350	17	40	60	179 ~ 229	正火 回火	870 ~ 890 640 ~ 660	空 炉、空

(续)

钢 号	截面尺寸 /mm	试样 方向	试验状态	力 学 性 能						热 处 理		
				σ_b / MPa \geq	σ_s / MPa \geq	δ_5 (%) \geq	φ (%) \geq	a_K /J· cm ⁻² \geq	HBW	类型	温度 /℃	冷却
30CrMnSi	≤ 100	纵向	正火 + 回火	650	400	16	40	30	≤ 229			
	$> 100 \sim 200$			600	350	16	40	30	≤ 229			
	≤ 100		淬火 + 回火	850	600	16	35	60	241 ~ 285	淬火	860 ~ 880	水、油
	$> 100 \sim 200$			720	470	16	35	50	229 ~ 269	回火	620 ~ 640	水
45CrV	400 ~ 600	纵向	淬火 +	800	600	12	40	30	241 ~ 285	淬火	850 ~ 870	油
	$> 600 \sim 900$		回火	750	520	10	38	25	229 ~ 269	回火	540 ~ 590	炉
37SiMn- 2MoV (35SiMn- MoV)	≤ 100	纵向	淬火 + 回火	900	750	14	40	50	241 ~ 286	淬火	870 ~ 890	油
	$> 100 \sim 300$			850	700	14	40	50				
	$> 300 \sim 500$			800	650	14	40	50	220 ~ 269	回火	630 ~ 650	空
	$> 500 \sim 700$			750	600	14	40	40				
42MnMoV	≤ 100	纵向	淬火 + 回火	800	650	12	40	50	241 ~ 286	淬火	830 ~ 850	油
	$> 100 \sim 300$			750	600	12	40	50				
	$> 300 \sim 500$			700	550	12	35	40	228 ~ 269	回火	580 ~ 650	空
	$> 500 \sim 700$			650	500	12	35	30				
34CrNiMo	≤ 100	纵向	淬火 + 回火	870	750	15	45	70	≤ 321	淬火	850 ~ 870	油
	$> 100 \sim 300$			780	650	14	40	60				
	$> 300 \sim 500$			700	550	14	35	50		回火	560 ~ 640	炉
	$> 500 \sim 800$			650	500	14	32	40				
34CrNi- 3Mo	≤ 100	纵向	淬火 + 回火	920	800	14	40	70	表面	淬火	850 ~ 870	油
	$> 100 \sim 300$			870	750	14	38	60	264 ~ 341			
	$> 300 \sim 500$			820	700	13	35	50	表面			
	$> 500 \sim 800$			750					262 ~ 321	回火	550 ~ 640	炉
18CrNiW	25	纵向	一次淬火 +							一次	950	空
			二次淬火 + 回火	1150	850	12	50	100		二次	850	空
										淬火		
	≤ 150	纵向	淬火 + 回火	1150	850	11	40	90	表面	回火	150 ~ 170	空
				1100	800	12	50	90	332 ~ 387	淬火	860 ~ 870	空
										回火	860 ~ 870	油
										回火	550 ~ 570	油

表 19-13 不锈钢和耐酸钢热处理后的力学性能

钢 号	截面尺寸 /mm	试样 方向	力 学 性 能					HBW	热 处 理		
			σ_b / MPa \geq	σ_s / MPa \geq	δ_5 (%) \geq	φ (%) \geq	a_K /J· cm ⁻² \geq		类 型	加热温度 /℃	冷 却
1Cr13	≤ 60	纵向	600	420	20	60	90	187 ~ 217	淬火 + 回火	1000 ~ 1050 700 ~ 790	油、水 油、水、空
2Cr13	≤ 100	纵向	660	450	16	55	80	97 ~ 248	淬火 + 回火	1000 ~ 1050 680 ~ 720	油、空 空
3Cr13	≤ 100	纵向 切向	850	650	12	45	50	— ≥ 241	淬火 + 回火	1000 ~ 1050 600	油 空
			850	650	10	30	40				

(续)

钢 号	截面尺寸 /mm	试样 方向	力 学 性 能					HBW	热 处 理		
			σ_b / MPa \geq	σ_s / MPa \geq	δ_5 (%) \geq	ψ (%) \geq	a_K /J· cm ⁻² \geq		类 型	加热温度 /℃	冷 却
2Cr18Ni9	≤ 60	纵向	650	250	40	50	100	207 ~ 341	淬火	1100 ~ 1150	水
	> 60 ~ 100		600	240	35	45	80				
	> 100 ~ 200		580	220	30	—	60				
1Cr18Ni9Ti	≤ 60	纵向	550	220	40	55	100	≤ 192	淬火	1100 ~ 1150	水
	> 60 ~ 100		540	200	38	50	80				
	> 100 ~ 200		500	200	25	30	60				

2. 大型铸钢件化学成分、热处理工艺和性能

(1) 化学成分(表 19-14 ~ 表 19-16)

表 19-14 铸钢的化学成分

钢 号	元素含量(质量分数)(%)										用 途
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	V	Cu	
				不 大 于							
30	0.27 ~ 0.35	0.20 ~ 0.42	0.40 ~ 0.90	0.045	0.040	≤0.30	≤0.30	—	—	≤0.30	涡轮机壳体和座圈,水轮机零件,手柄,摇臂轴,减速器壳体,联轴节,机座,梁,轮箍,飞轮等
20SiMn	0.16 ~ 0.22	0.60 ~ 0.80	1.00 ~ 1.30	0.030	0.030	≤0.30	≤0.30	—	—	≤0.30	有大范围焊接的焊接铸造结构的零件,水轮机的柱,叶片和轴,阀和涡轮机导管的异形铸件
08MnCuNi	≤0.10	0.15 ~ 0.40	0.60 ~ 1.00	0.035	0.035	≤0.30	1.15 ~ 1.55	—	0.10 (按计算)	0.80 ~ 1.20	在 < - 60℃ 温度下工作的铸造零件
20CrMoV	0.18 ~ 0.25	0.20 ~ 0.40	0.60 ~ 0.90	0.025	0.025	0.90 ~ 1.20	≤0.30	0.50 ~ 0.70	0.20 ~ 0.30	—	在 < 540℃ 温度下工作的蒸汽轮机零件,汽缸,阀体,座圈,阀盖和阀门,以及涡轮机导管的的其他异形铸件

表 19-15 铸造涡轮机外壳用钢的化学成分

钢 号	化学成分(质量分数)(%)									
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	V	其他 元素
				<						
25	0.22 0.27	0.17 0.37	0.5 0.8	0.045	0.040	≤0.3	≤0.3	—	—	—
15Cr1Mo1V	0.14 0.20	0.20 0.40	0.6 0.9	0.025	0.025	1.2 1.7	≤0.3	0.9 1.2	0.25 0.40	≤0.03 Cu
15Cr3MoV	0.12 0.18	0.20 0.40	0.6 0.8	0.025	0.025	2.8 3.1	≤0.3	0.9 1.1	0.03 0.08	0.05 ~ 0.15Zr

表 19-16 水轮机用钢的化学成分

钢 号	化学成分(质量分数)(%)							
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
				≤				
20Cr13Ni	0.17 ~ 0.22	0.3 ~ 0.6	≤0.8	0.03	0.03	11.5 ~ 13.5	0.6 ~ 1.0	—
0Cr12NiCu	≤0.1	≤0.4	0.3 ~ 0.6	0.025	0.025	12.0 ~ 13.5	1.0 ~ 1.5	1.0 ~ 1.2
0Cr18Ni3Mn3Cu3	≤0.1	≤0.6	2.5 ~ 3.0	0.025	0.025	17.5 ~ 19.0	3.0 ~ 3.5	1.8 ~ 2.2
00Cr12Ni3Cu	≤0.06	≤0.4	≤0.6	0.025	0.025	12.0 ~ 13.5	2.8 ~ 3.2	1.0 ~ 1.3

(2) 热处理工艺(图 19-90 ~ 图 19-93)

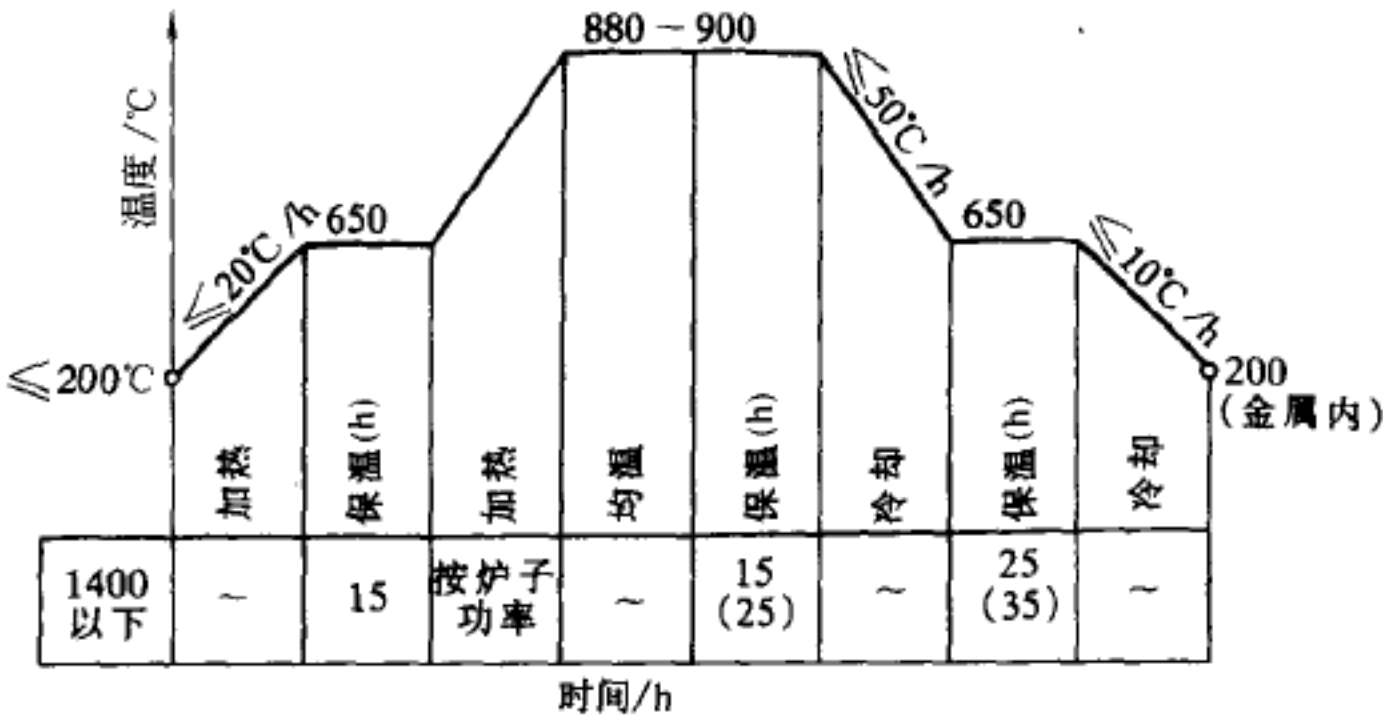


图 19-90 ≤1400mm 的 25, 30 铸钢件的退火规范(括号内标的保温时间适用于尺寸为 1400 ~ 2500mm 的横梁)

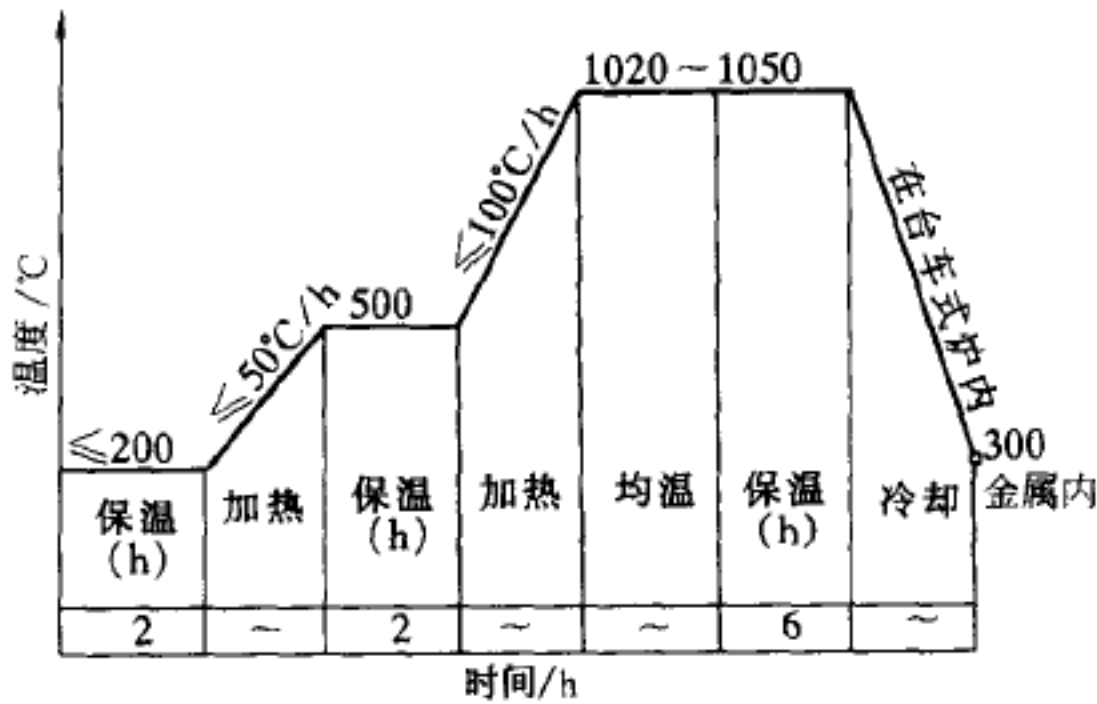


图 19-91 由 15Cr1Mo1V 钢制的铸件(切除冒口前)均匀化处理的规范

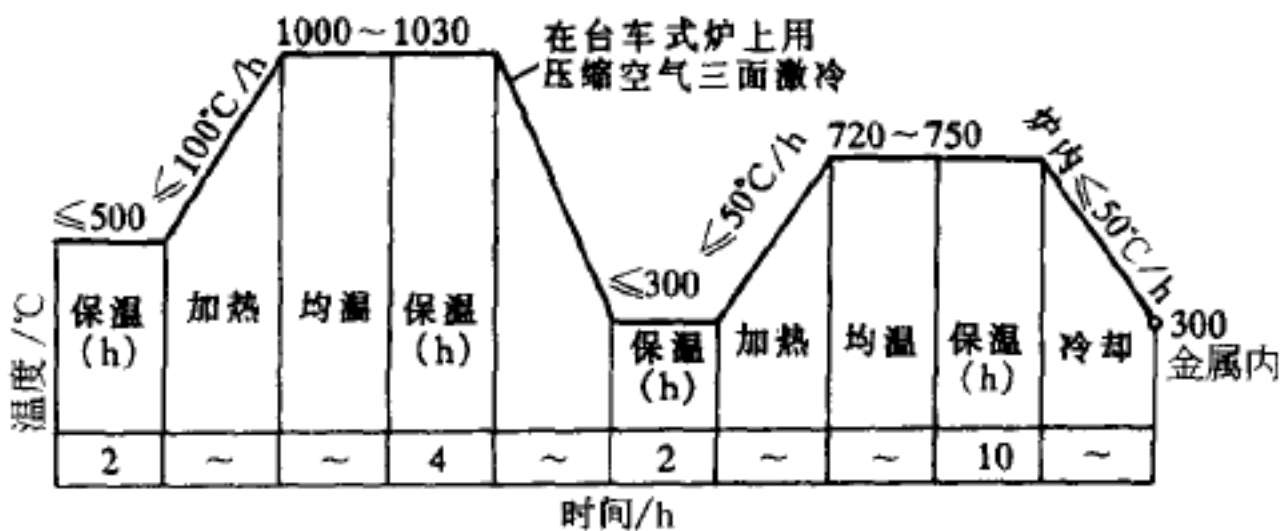


图 19-92 由 15Cr1Mo1 钢制的铸件切除冒口后正火加回火的规范

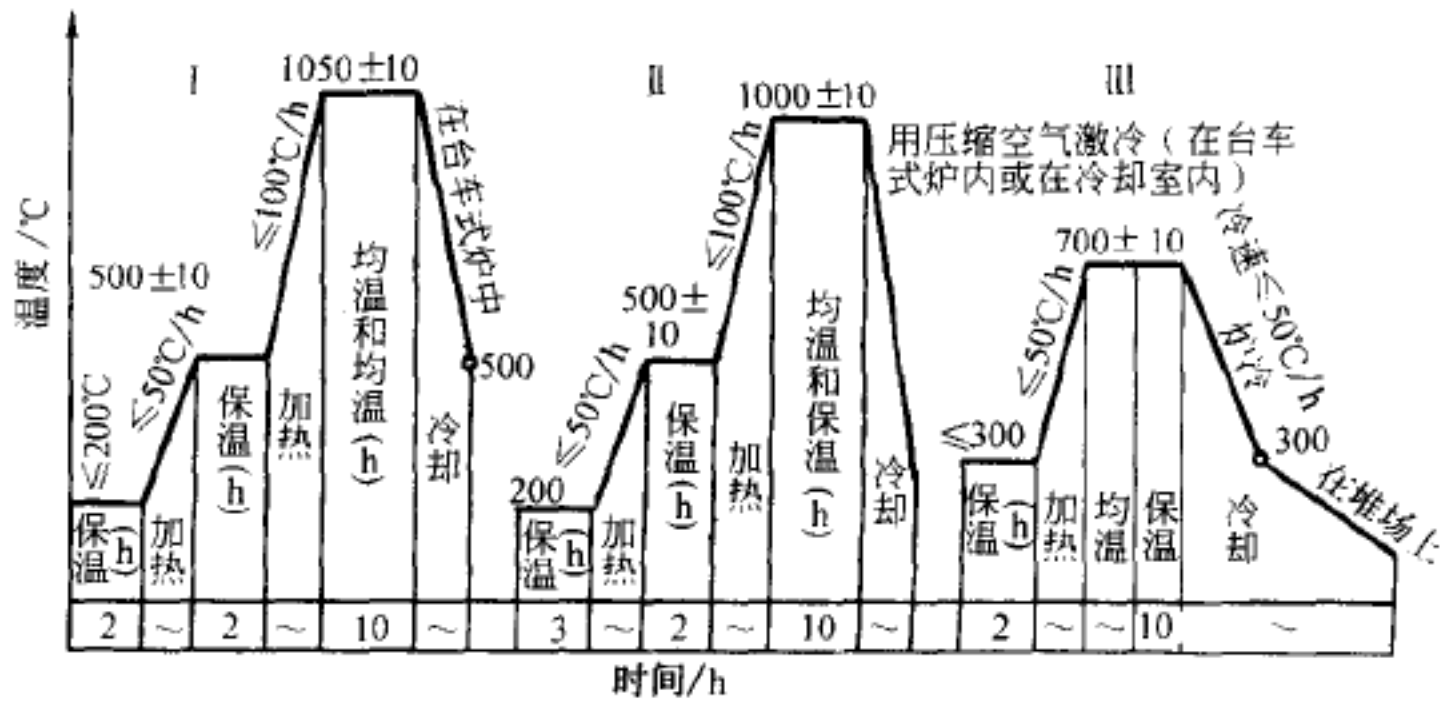


图 19-93 15Cr3MoV 钢的铸件热处理规范
I—均匀化处理 II—正火 III—回火

(3) 力学性能(表 19-17 ~ 表 19-20)

表 19-17 15Cr3MoV 钢力学性能与回火温度的关系

回火温度 /℃	$\sigma_{0.2}$	σ_b	δ	ψ	$a_K /$	HBW
	/MPa		(%)		$J \cdot cm^{-2}$	
700	485	645	20.0	67.5	100	180
720	475	640	21.5	62.0	100	180
740	455	620	22.0	63.5	135	187

表 19-18 铸钢的力学性能

钢 号	热处理 ^①	温 度 /℃	截 面 /mm	$\sigma_{0.2}$	σ_b	δ	ψ	$a_K /$ $J \cdot cm^{-2}$	HBW
				/MPa		(%)			
30	正 火 回 火	880 ~ 900 610 ~ 630	300 以下	26	48	17	30	35	131 ~ 157
20SiMn	正 火 回 火	870 ~ 890 570 ~ 600	300 以下	26	$\frac{50}{50}^{②}$	14	30	$\frac{35}{35}^{②}$	—
08MnCuNiV	均匀化处理	950 ~ 1050	100 以下	35	45	18	30	50	≥ 130
	正 火	900 ~ 950							
	回 火	580 ~ 630							
20CrMoV	均匀化处理	910 ~ 1000	100 以下	32 ~ 55	50	15	30	30	159 ~ 223
	正 火	960 ~ 980							
	回 火	710 ~ 740							
	均匀化处理	970 ~ 1000	150 × 170	28 ~ 55	50	16	35	30	159 ~ 223
	正 火	960 ~ 980	100 × 150	30 ~ 55					
	回 火	710 ~ 740	60 × 150	32 ~ 55					

① 从均匀化处理温度,正火和回火温度冷却下来的冷却介质是空气。
② 焊接接头的力学性能。

表 19-19 制造水轮机零件用的耐腐蚀钢的热处理规范,能保证的力学性能和使用的范围

钢 号	热 处 理 规 范	力学性能(不小于)						HBW	用 途
		$\sigma_{0.2}$	σ_b	δ	ψ	在下面温度的 $a_K/J \cdot cm^{-2}$			
		/MPa		(%)		+ 20	- 40		
20Cr13Ni	1050℃正火;760℃回火	45	60	14	30	30	—	196 ~ 229	厚度小于 200mm, 重量 $\leq 10 \sim 15t$ 的回转叶片水轮机的叶片

(续)

钢 号	热 处 理 规 范	力学性能(不小于)						HBS	用 途
		$\sigma_{0.2}$	σ_b	δ	ψ	在下面温度的 $\alpha_K/J \cdot cm^{-2}$			
		/MPa		(%)		+ 20	- 40		
0Cr12NiCu	1050℃正火;760℃回火	30	50	12	30	20	—	187~229	1. 回转叶片水轮机 上重而大的叶片 2. 适宜温度和气候 在炎热气候工作的焊 接和整体浇注的叶轮
	950℃正火;670℃回火	50	65	14	30	60	30	201~255	
	950℃正火;670℃	45	60	17	45	70	—	201~255	
	回火 15h;670℃								
	回火 20h(焊接后)								
0Cr18Ni3Mn3Cu2	1070℃正火;800℃回火 冷到 20℃;600℃回火 24h	55	70	13	30	30	—	240~265	处于冲击状态和承 受中等压力($H \leq 80m$) 的焊接和整体浇注的 叶轮
00Cr12Ni3Cu	950+800℃两次正火; 600~620℃回火	60	80	14	30	80	50	240~255	大型的和焊接的整 体浇注的叶轮

表 19-20 15Cr1Mo1V 钢试验温度对力学性能的影响

试 验 温 度 /℃	$\sigma_{0.2}$	σ_b	δ	ψ	$a_K /$ $J \cdot cm^{-2}$
	/MPa		(%)		
20	35.0	55.0	17.0	69.0	35
100	32.0	51.5	17.5	63.0	40
200	28.0	47.0	20.0	67.5	140
300	31.5	52.5	16.0	60.5	120
500	26.0	35.5	24.5	78.0	100
600	22.5	24.0	25.0	92.0	80

19.2 电站设备大件用钢化学成分、热处理工艺和性能

1. 发电机转子和低压转子热处理

(1) 化学成分(表 19-21)

表 19-21 各国发电机转子和低压转子用钢化学成分

国别	转子名称	钢 种	化学成分(质量分数)(%)													
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mn	V	Cu	Al	As	Sn	Sb
中 国	发 电 机	34CrMo1A	0.30	0.17	0.40	≤	≤	0.70	≤	0.40	—	≤				
			~	~	~			~	0.40	~		0.20				
		34CrNi1Mo	0.38	0.31	0.70	0.020	0.020	1.20		0.55						
			0.30	0.17	0.50	≤	≤	1.30	1.30	0.20		≤				
		34CrNi3Mo	~	~	~	0.015	0.018	~	~	~	—	0.20				
			0.40	0.31	0.80			1.70	1.70	0.30						
		25CrNi1MoV	0.30	0.17	0.50	≤	≤	0.70	2.75	0.25		≤				
			~	~	~	0.015	0.018	~	~	~	—	0.20				
		25Cr2Ni4MoV	0.40	0.31	0.80			1.10	3.25	0.40						
			0.22	≤	≤	≤	≤	1.00	1.00	0.25	0.01	≤				
			~	0.30	0.70	0.015	0.018	~	~	~	~	0.20				
			0.28					1.50	1.50	0.40	0.15					

(续)

国别	转子名称	钢 种	化学成分(质量分数)(%)														
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mn	V	Cu	Al	As	Sn	Sb	
中国	低压	30Cr2Ni4MoV	≤ 0.35	0.17 ~ 0.37	0.20 ~ 0.40	≤ 0.012	≤ 0.012	1.50 ~ 2.0	3.25 ~ 3.75	0.30 ~ 0.60	0.07 ~ 1.15	≤ 0.20	≤ 0.015	≤ 0.020	≤ 0.015	≤ 0.0015	
美 WH[2]GE	发电机	Ni3.5CrMoV	≤ 0.25	≤ 0.10	0.15 ~ 0.35	≤ 0.015	≤ 0.018	1.50 ~ 2.00	3.25 ~ 4.00	0.20 ~ 0.50	0.05 ~ 0.13					参考	
		Ni3MoV	0.20 ~ 0.27	0.06 ~ 0.12	≤ 0.45	≤ 0.015	≤ 0.015	2.50 ~ 3.10	0.30 ~ 0.40	0.04 ~ 0.12							
	低压	Ni3.5CrMoV	≤ 0.35	≤ 0.12	0.20 ~ 0.40	≤ 0.015	≤ 0.015	1.50 ~ 2.00	3.25 ~ 3.75	0.30 ~ 0.60	0.07 ~ 0.15	≤ 0.20	≤ 0.015	≤ 0.020	≤ 0.015		≤ 0.0015
		发电机	Ni2CrMoV	0.2 ~ 0.35	0.08 ~ 0.35	0.2 ~ 0.80	≤ 0.025	0.008 ~ 0.025	1.0 ~ 1.5	1.7 ~ 2.3	0.30 ~ 0.60	0.05 ~ 0.15					
英 GE[3]	发电机	Ni3.5CrMoV	0.2 ~ 0.35	0.08 ~ 0.12	≤ 0.4	≤ 0.025	0.008 ~ 0.025	1.0 ~ 1.8	3.25 ~ 3.75	0.30 ~ 0.60	0.05 ~ 0.15						
		发电机	Ni3.5CrMoV	0.22 ~ 0.30	≤ 0.20	0.20 ~ 0.60	≤ 0.015	≤ 0.015	1.50 ~ 2.00	3.20 ~ 3.80	0.30 ~ 0.55	0.07 ~ 0.17	≤ 0.15		≤ 0.015	≤ 0.015	≤ 0.0015
法 GA	发电机	Ni3.5CrMoV	0.22 ~ 0.30	≤ 0.20	0.20 ~ 0.60	≤ 0.015	≤ 0.015	1.50 ~ 2.00	3.20 ~ 3.80	0.30 ~ 0.55	0.07 ~ 0.17	≤ 0.15		≤ 0.015	≤ 0.015	≤ 0.0015	
同时 $10 \times [(P \times 10) + As + (Sn \times 4)] \leq 2$																	
德 KWU	发电机	Ni2.8CrMoV (26NiCrMoV15)	0.22 ~ 0.28	< 0.10	0.20 ~ 0.40	< 0.010	< 0.010	1.40 ~ 1.70	2.80 ~ 3.00	0.30 ~ 0.45	< 0.15		< 0.005				
	低压	Ni3.5CrMoV (26NiCrMoV145)	0.22 ~ 0.28	≤ 0.07	≤ 0.40	≤ 0.007	≤ 0.007	1.40 ~ 1.70	3.40 ~ 3.60	0.30 ~ 0.45	≤ 0.15		≤ 0.010				
		Ni3.5CrMoV	0.26 ~ 0.32	≤ 0.07	≤ 0.40	≤ 0.007	≤ 0.007	1.40 ~ 1.70	3.40 ~ 3.60	0.30 ~ 0.45	≤ 0.15		≤ 0.010				
		$w(P+Sn) \leq 0.015\%$															
日 本	发电机	Ni3.5MoV	≤ 0.28	≤ 0.3	≤ 0.45	≤ 0.020	≤ 0.020	≤ 0.25	≥ 3.5	0.28 ~ 0.38	0.09 ~ 0.15						
		Ni3.5CrMoV	≤ 0.28	≤ 0.10	≤ 0.40	≤ 0.020	≤ 0.020	1.50 ~ 2.00	3.25 ~ 3.75	0.25 ~ 0.45	0.09 ~ 0.15						
	低压	Ni3.5CrMoV	≤ 0.30	≤ 0.10	≤ 0.50	≤ 0.015	≤ 0.015	1.50 ~ 2.00	3.25 ~ 3.75	0.30 ~ 0.50	0.07 ~ 0.15						
		发电机	Ni3.5CrMoV	0.25 ~ 0.30	0.15 ~ 0.35	0.15 ~ 0.35	≤ 0.012	≤ 0.010	1.30 ~ 1.70	3.40 ~ 3.80	0.40 ~ 0.70	0.05 ~ 0.13					
俄罗斯	发电机	Ni3.5CrMoV	0.25 ~ 0.30	0.15 ~ 0.35	0.15 ~ 0.35	≤ 0.012	≤ 0.010	1.30 ~ 1.70	3.40 ~ 3.80	0.40 ~ 0.70	0.05 ~ 0.13						
	低压	Ni3.5CrMoV	0.27 ~ 0.30	≤ 0.17	0.20 ~ 0.45	≤ 0.012	≤ 0.015	1.30 ~ 1.70	3.40 ~ 3.80	0.50 ~ 0.70	0.12 ~ 0.18	≤ 0.20					

注:采用真空碳脱氧时,硅不大于0.10%。

(2) 冷却曲线(图 19-94 ~ 图 19-97)

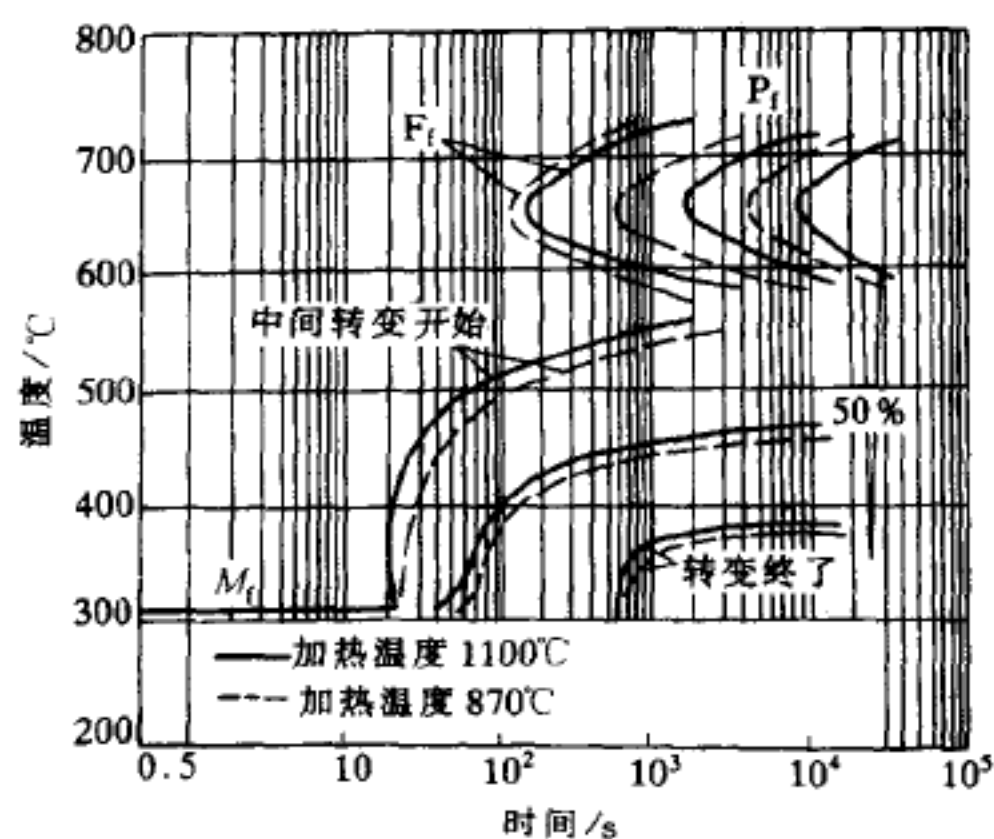


图 19-94 34CrNi1Mo 钢的 TTT 曲线

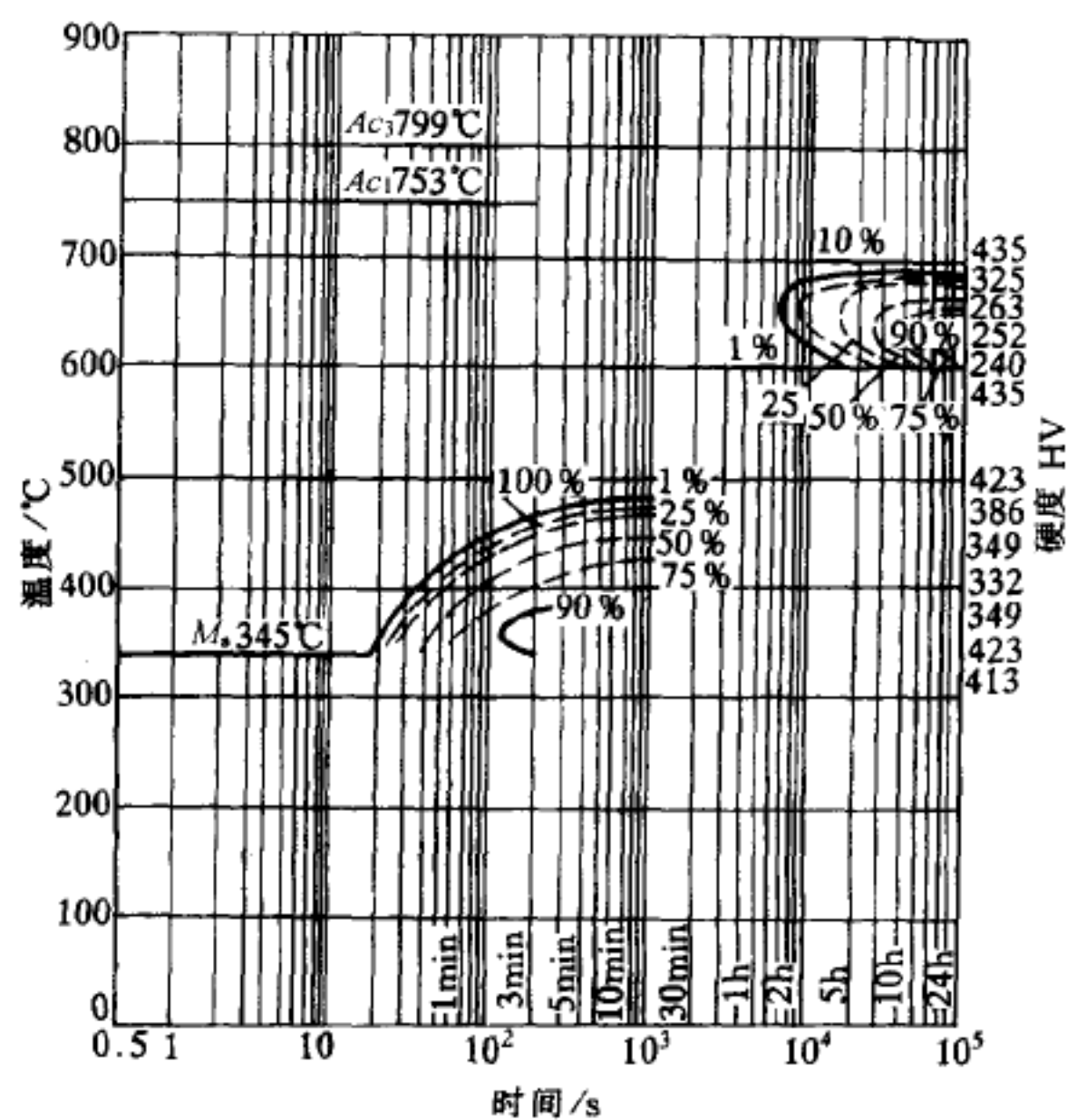
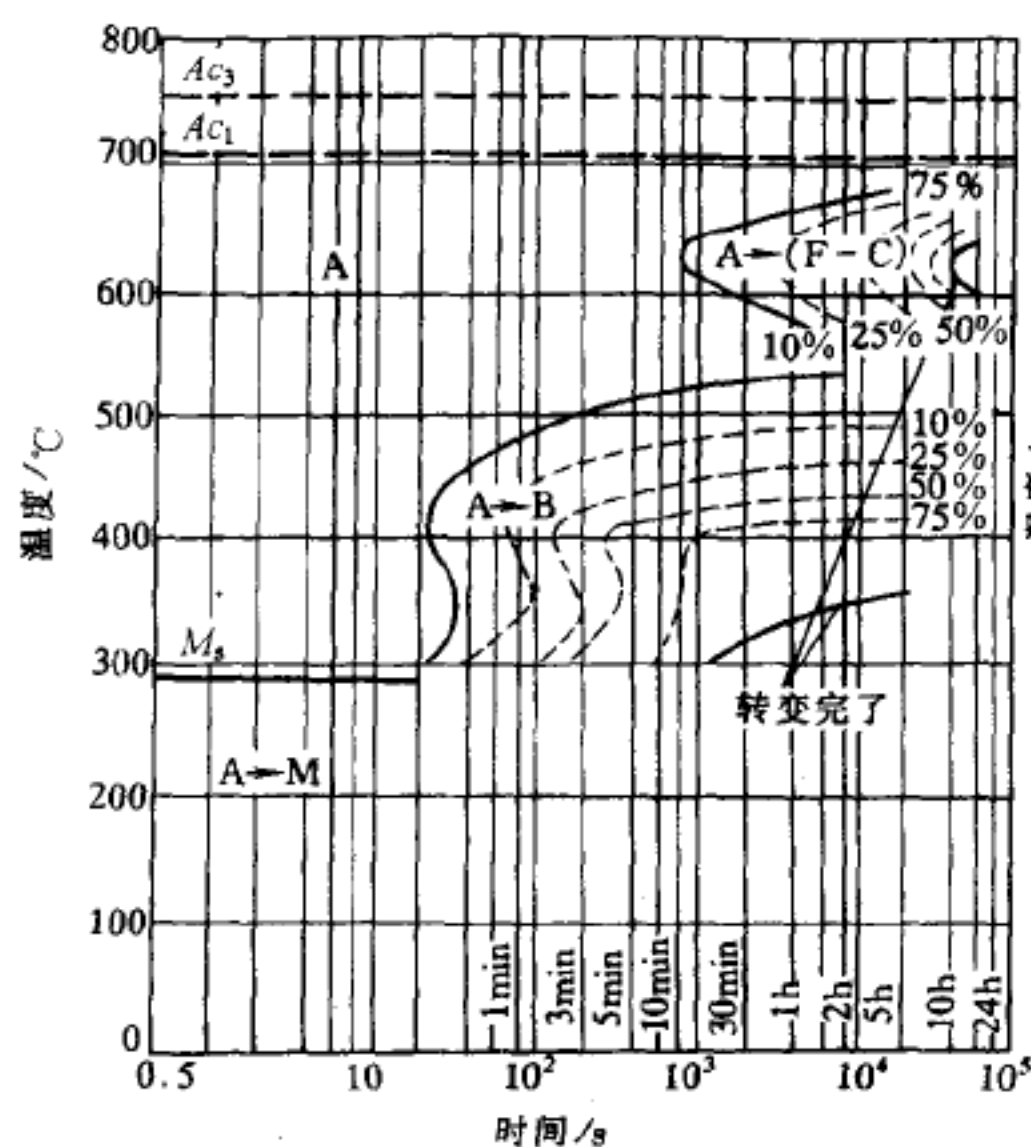
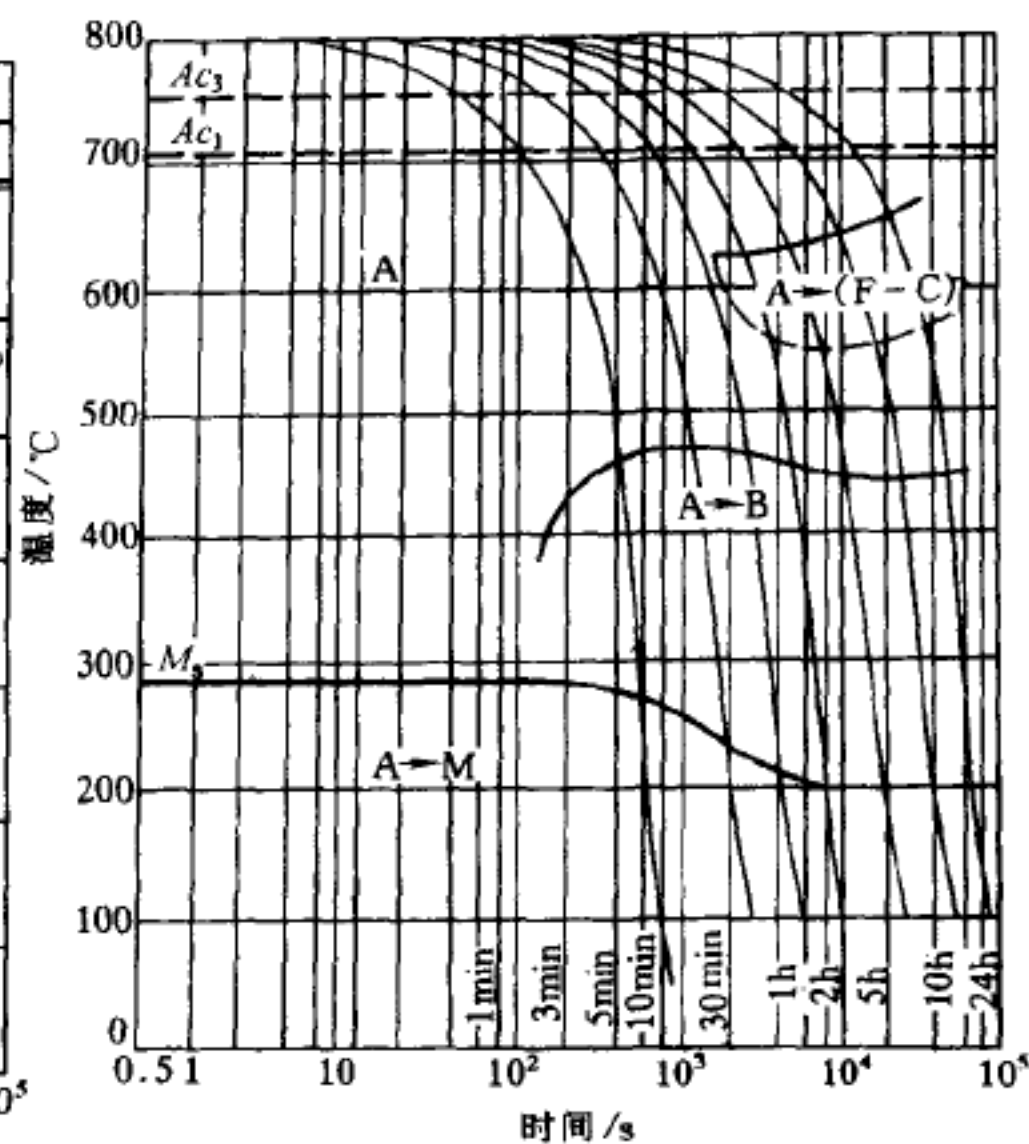


图 19-95 30Cr2Ni4MoV 钢的 CCT 曲线

原始状态:退火 奥氏体化:840°C 15min 奥氏体晶粒度 7 级



a)



b)

图 19-96 34CrNi3Mo 钢的奥氏体等温转变图和
奥氏体连续冷却转变图

a) 奥氏体等温转变图 b) 奥氏体连续冷却转变图

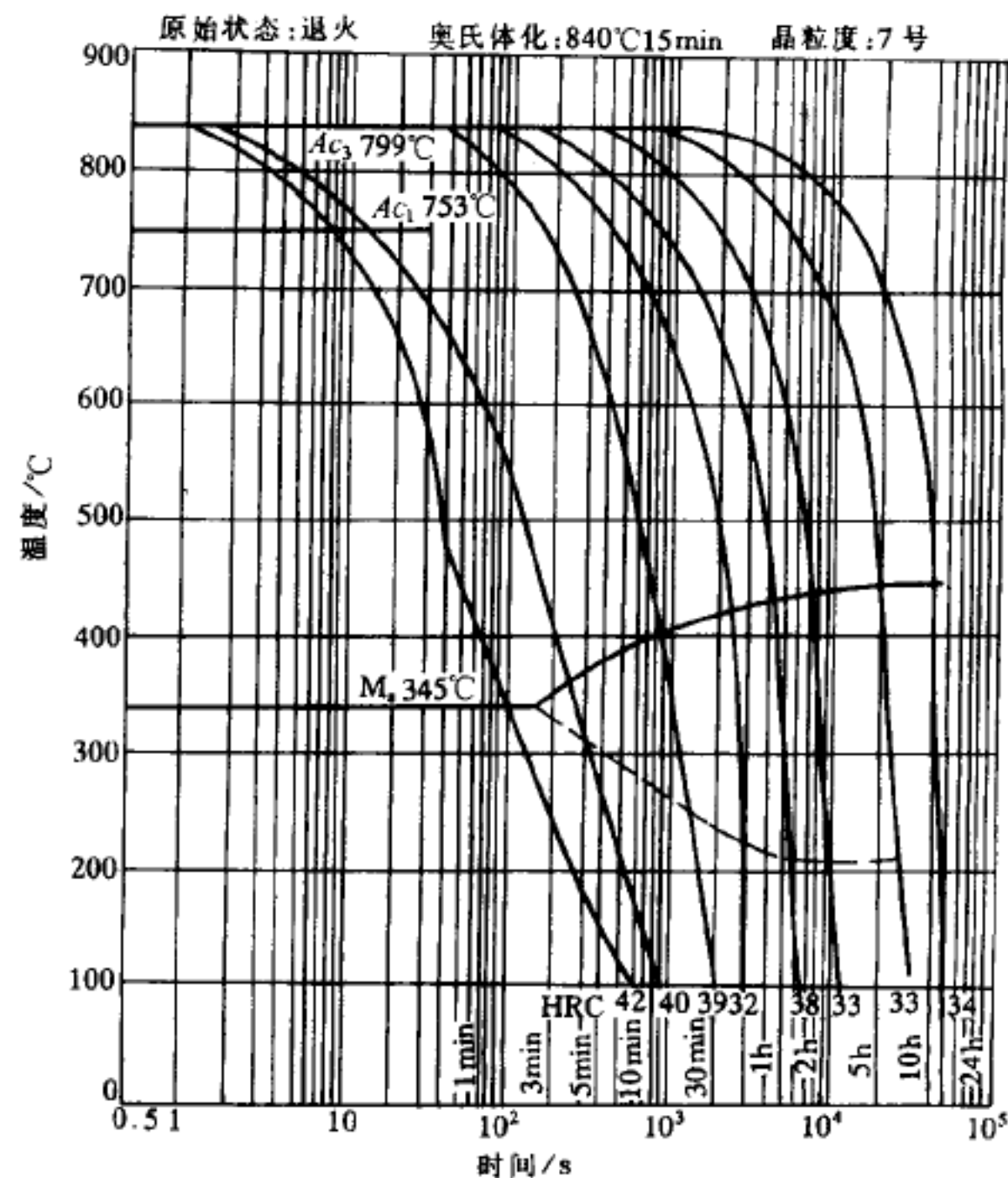


图 19-97 25Cr2Ni4MoV 钢的奥氏体连续冷却转变图 (w_C 0.26%, w_{Mn} 0.28%, w_{Si} 0.23%, w_S 0.014%, w_P 0.012%, w_{Ni} 3.31%, w_{Cr} 1.63%, w_{Mo} 0.45%, w_V 0.11%)

(3) 热处理工艺(图 19-98 ~ 图 19-104,表 19-22)

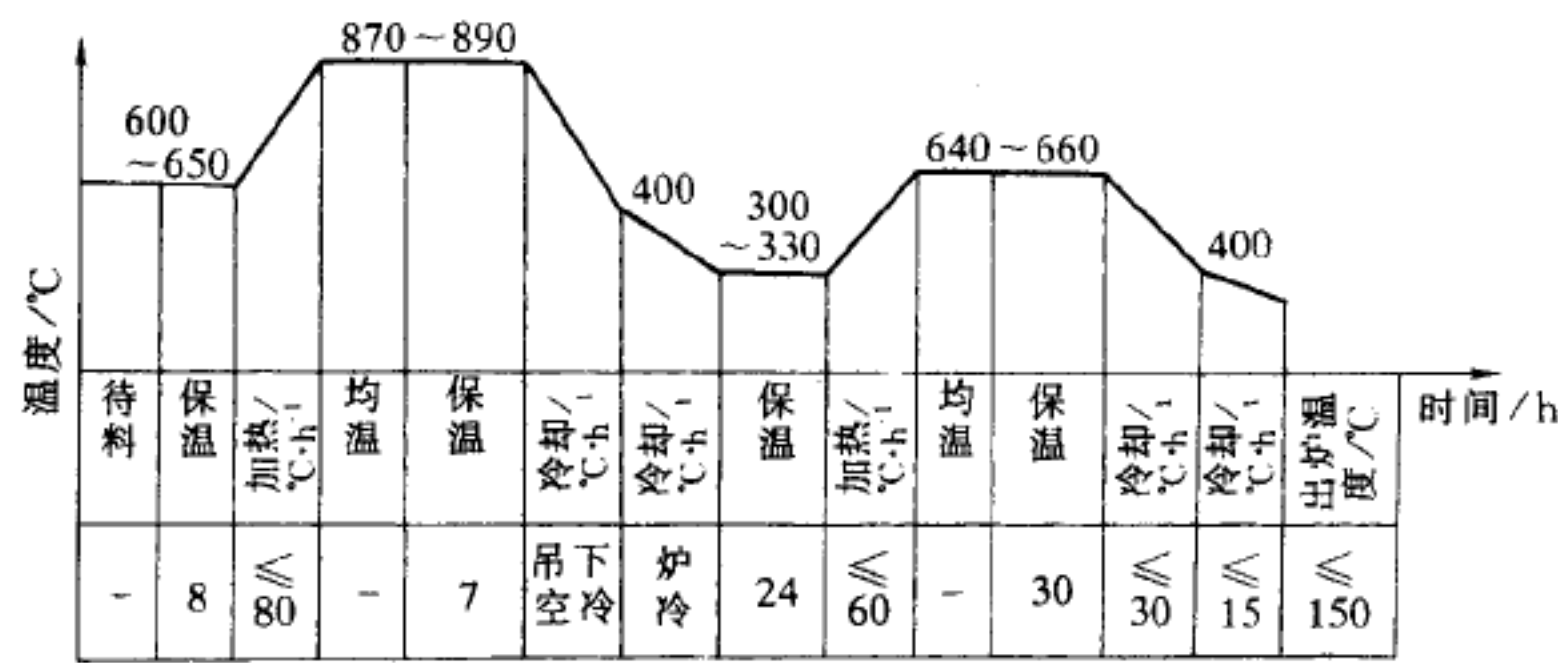
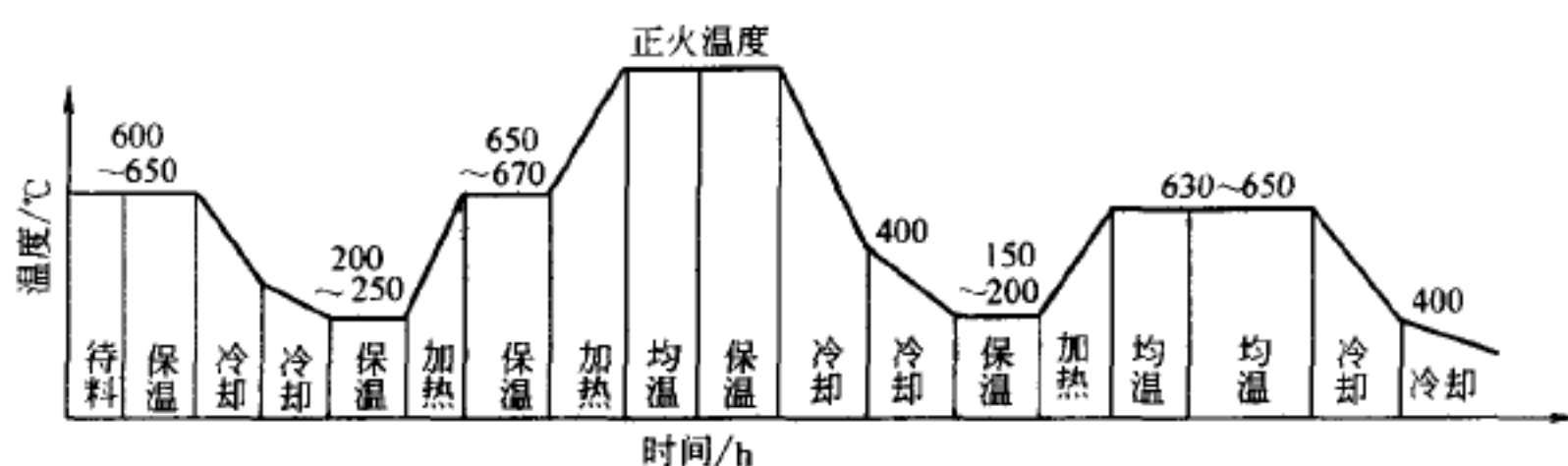


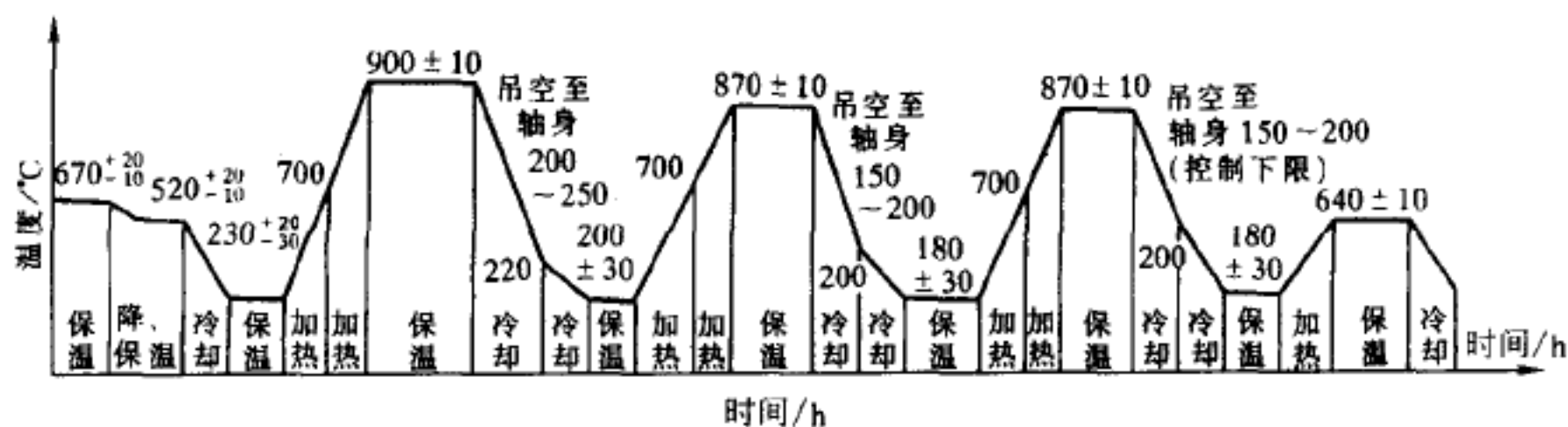
图 19-98 34CrMo1A 钢汽轮发电机转子预备热处理工艺



	待料	保温	冷却/ ℃· h ⁻¹	冷却/ ℃· h ⁻¹	保温	加热/ ℃· h ⁻¹	保温	加热/ ℃· h ⁻¹	均温	保温	冷却/ ℃· h ⁻¹	冷却/ ℃· h ⁻¹	保温	加热/ ℃· h ⁻¹	均温	保温	冷却/ ℃· h ⁻¹	冷却/ ℃· h ⁻¹	出炉 温度/ ℃
型式 I	~	12	停火 炉冷	停火 炉冷	36	≤ 60	18	≤ 80	~	12	空冷	封炉 冷	36	≤ 60	~	40~ 200	≤ 20	≤ 10	≤ 150
型式 II	~	5	43h		12 32	> 24					(23)		12 36	10	40		封炉冷		≤ 150

图 19-99 34CrNi1Mo、34CrNi3Mo 钢发电机转子预备热处理工艺

○内为转子锻件轴身所设热电偶到温后时间 ()内时间供参考



转子类型	保温	降、保温	冷却	保温	加热	加热	保温	冷却	冷却	保温	加热	加热	保温	冷却	冷却	保温	加热	加热	保温	冷却	冷却	保温	加热	保温	冷却	出炉温度 /℃
200MW 发电机 转子	6	> ⑩ (9)	> 36	⑨ 17	16	> (17)	10	(28)	6	⑨ 11	17	> (17)	10	(28)	—	—	—	—	—	—	4	⑨ 14	12	40	(40)	≤ 150
300MW 发电机 转子	8	> ⑩ (11)	> 36	⑪ 22	21	> (21)	13	(34)	7	⑪ 15	22	> (21)	13	(34)	—	—	—	—	—	—	5	⑪ 18	16	10	(50)	≤ 150
300、 600MW 低压 转子	13	> ⑩ (20)	> (55)	⑬ 37	43	> (32)	26	(50)	12	⑬ 25	46	> (32)	26	(50)	7	⑬ 30	46	> (32)	26	150	7	⑬ 30	33	26 ~ 50	(130)	≤ 150 轴身 ≤ 200
300、 600MW 低压 转子	13	> ⑩ (20)	> (55)	⑬ 37	43	> (32)	26	(50)	12	⑬ 25	46	> (32)	26	(50)	—	—	—	—	—	—	7	⑬ 30	33	26 ~ 50	(130)	≤ 150 轴身 ≤ 200

图 19-100 26Cr2Ni4MoV、30Cr2Ni4MoV 钢发电机转子、低压转子预备热处理工艺

注:1. 锻后入炉温度,轴身 500 ± 20 轴颈 $450 \pm 20^\circ\text{C}$ 2. 转子轴身敷偶,粗细部分以偶温为准。○内时间指偶到温后的保温时间,()内时间供参考 3. 轴颈空冷至 $280 \sim 350^\circ\text{C}$,套保护罩或缠石棉布保护 4. 钢包炉两次真空处理转子适用,括弧内时间供参考;圈内时间为转子锻件轴身所敷热电偶到温后的时间。

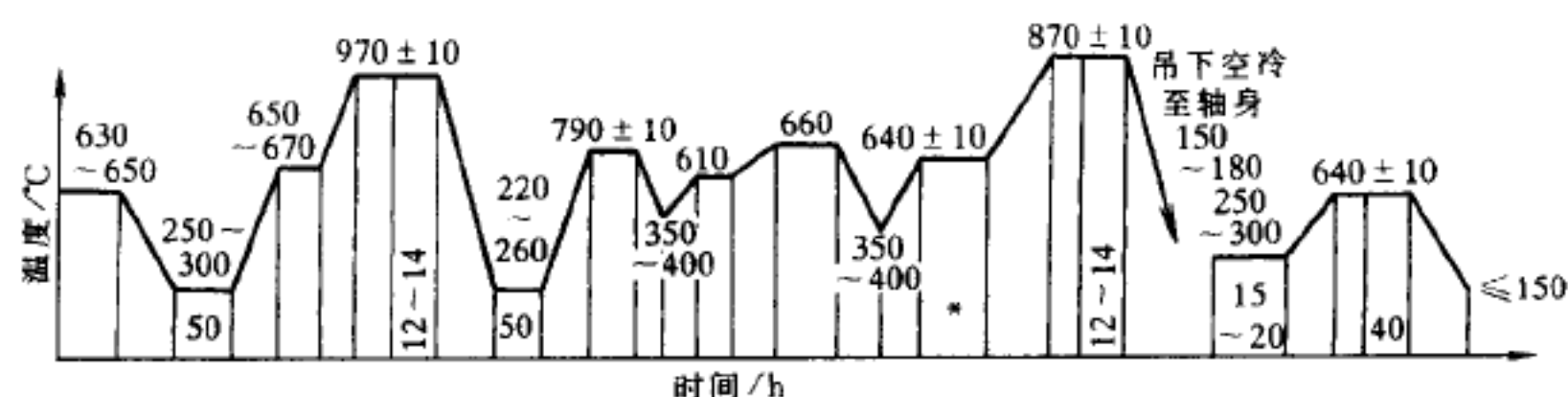


图 19-101 26Cr2Ni4MoV 钢发电机转子预备热处理工艺

注:1. 此工艺适用于碱性平炉真空碳脱氧工艺生产的 200、300MW 发电机转子锻件 2. * 处保温时间按实际氢含量计算:
200MW 转子 $[H] \leq 2 \times 10^{-6}$ 时为 100h; $(2 \sim 3) \times 10^{-6}$ 时为 300h; $(3 \sim 4) \times 10^{-6}$ 时为 500h 300MW 转子 $[H] \leq 2 \times 10^{-6}$ 时为 150h; $(2 \sim 3) \times 10^{-6}$ 时为 350h; $(3 \sim 4) \times 10^{-6}$ 时为 600h。

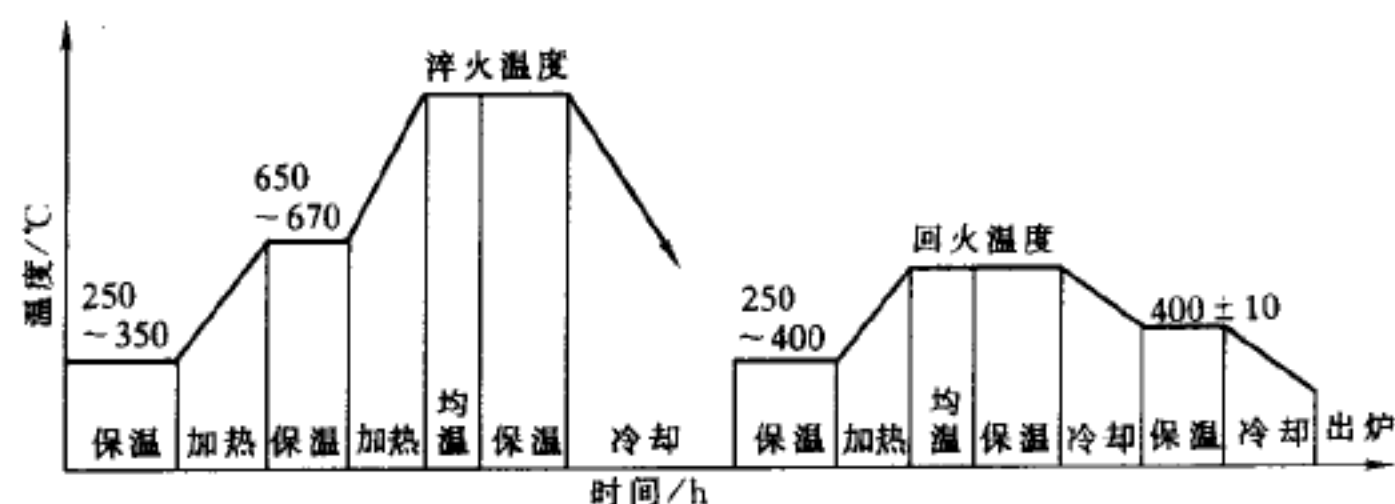


图 19-102 发电机转子、低压转子调质工艺

转子规格	保温	加热/ ℃·h ⁻¹	保温	加热/ ℃·h ⁻¹	均温	保温	冷却	保温	加热/ ℃·h ⁻¹	均温	保温	冷却/ ℃·h ⁻¹	保温	冷却/ ℃·h ⁻¹	出炉温度 /℃
12MW 34CrMo1A φ750 × 6470	—	—	4	≤100	~	8	油 150min	3	≤80	~	27	≤30	10	封炉冷	≤200
25MW 34CrNi1Mo φ846 × 8136	4	≤40	6	≤60	~	9	油 215min	5	≤40	~	20	≤30	9	≤15	≤200
60MW 34CrNi3Mo φ922	5	≤40	6	≤60	~	9	油 215min	5	≤40	~	28	≤30	10	≤15	200
100MW 25CrNi3MoV φ955 × 9710	6	≤40	7	功率	~	9	水 190min	5	≤30	~	30	≤30	10	炉冷	≤200
125MW 25Cr2NiMoV φ1335(轴端头)	4	≤50	5	≤80	~	7	空/水 5min/70min 3min/30min	5	≤40	~	28	≤30	—	封炉冷	≤200
300MW 26Cr2Ni4MoV φ1140 × 13730	8	≤40	20	功率	~	12	水 360min	8	≤30	~	40	≤20	15	≤15	≤200

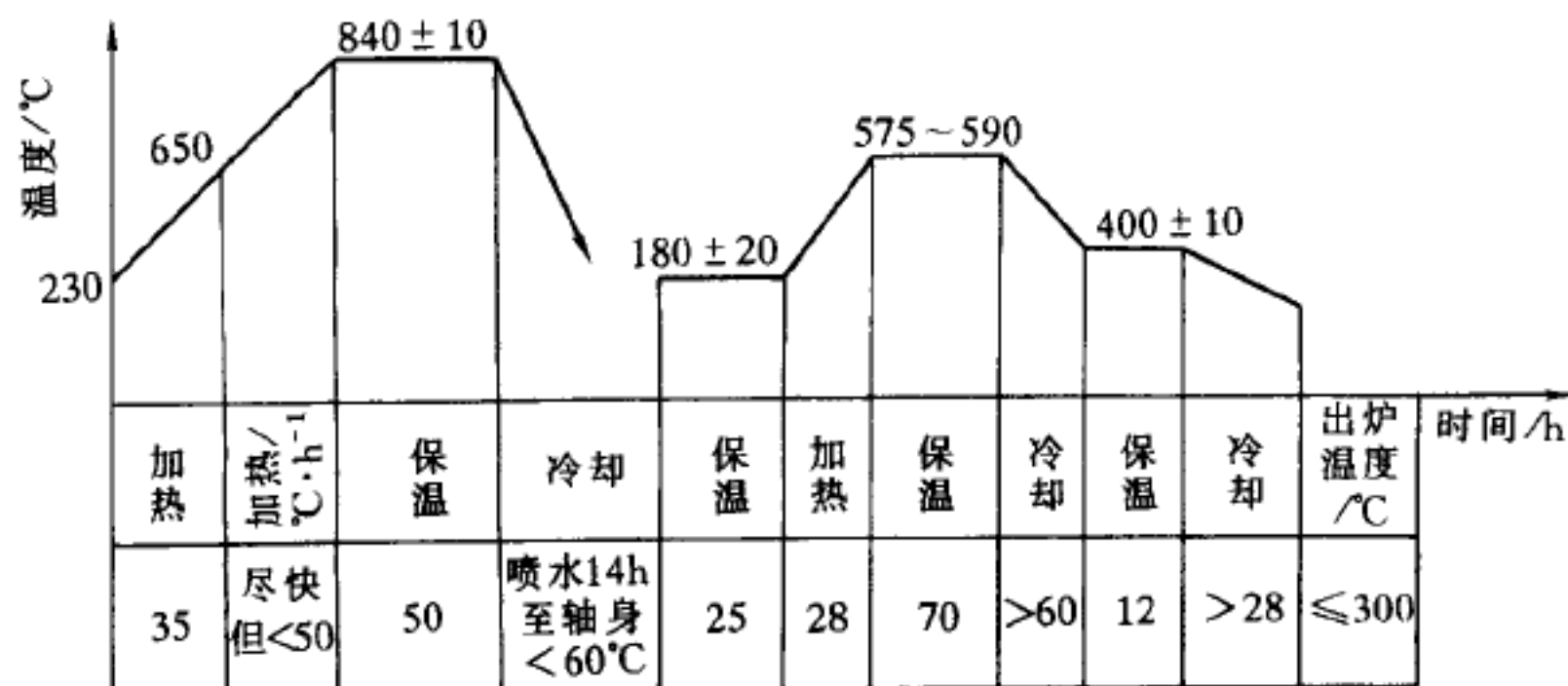


图 19-103 300MW 低压整体转子调质处理工艺

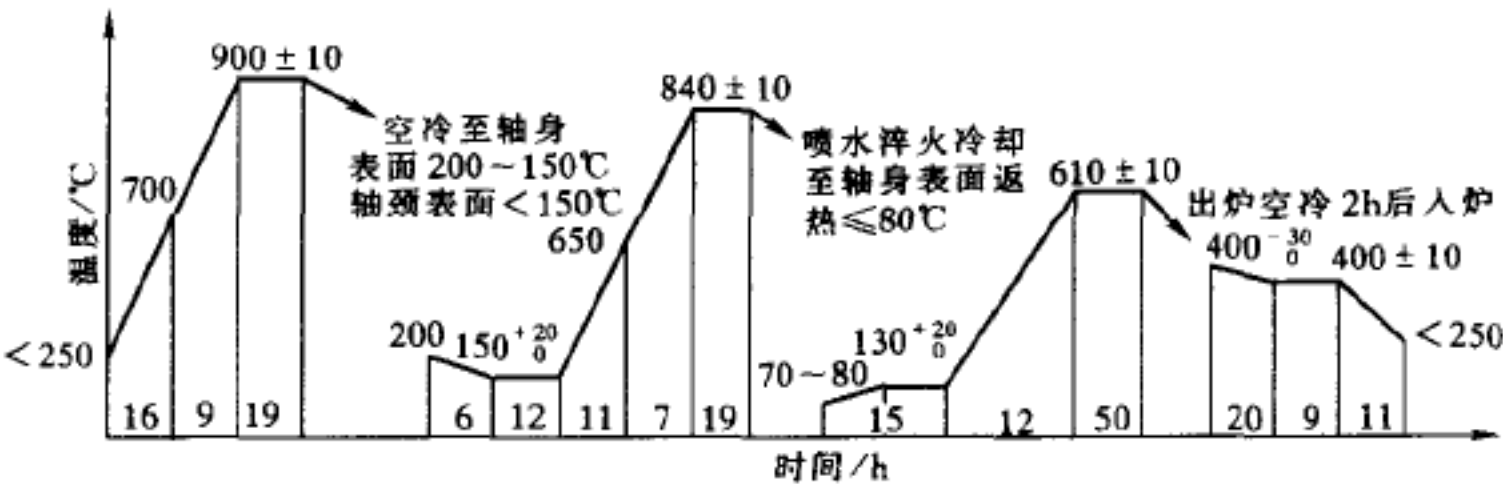


图 19-104 25Cr2Ni4MoV 钢 20 万 kW 发电机转子增加一次正火的调质工艺
注:此工艺也适用于 25Cr2Ni4MoV 钢低压转子增加一次正火的调质工艺

表 19-22 转子正偏析区碳含量和碳当量与淬火冷却条件

正偏析区碳含量(%)	正偏析区碳当量 w_c %	淬火冷却条件
≤ 0.31	≤ 0.75	水淬无危险
$0.32 \sim 0.36$	$0.76 \sim 0.88$	水淬要特别小心
≥ 0.36	≥ 0.88	严禁水淬

$$[C] = w_c \% + \frac{w_{Mn} \%}{20} + \frac{w_{Ni} \%}{15} + \frac{w_{Cr} \% + w_{Mo} \% + w_V \%}{10}$$

(4) 力学性能(表 19-23 ~ 表 19-26)

表 19-23 发电机转子力学性能要求

容量 /MW	推 荐 用 钢	取 样 方 向		$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ_4 (%)	ψ (%)	A_{KV} /J	FATT ₅₀ /℃
50 ~ 200	34CrMo1A 25CrNi1MoV 34CrNi1Mo	纵/切		440	585	16	35	50	
		径/中		390/	540/	15/			
	34CrNi3Mo 25CrNi1MoV	纵/切		490	640	16	35	60	
		径/中		440/	585/	15/	22/		
	25Cr2Ni4MoV	纵/切		540	690	17	45	90	
		径/中		490/450	640/590	17/15	45/40	90	0/5
	25Cr2Ni4MoV	纵/切		585	715	18	55	80	
		径/中		540/490	665/615	18/16	55/50	80	- 18/0
		纵/切		585	735	18	55	80	
		径/中		585/535	690/640	18/16	55/50	80	- 18/0
330	26NCD14—17 相当于 35NiCrMoV	径		700	800 ~ 920	14	35	56	0
		中		700	800			36	20
300 600	25Cr2Ni4MoV (26Cr2Ni4MoV)	Ⅰ	纵、切、径	590 ~ 690	670	18	55	100	径向 - 23
			中心纵	540 ~ 690	620	17	50		- 10
		Ⅱ	纵、切、径	660 ~ 760	740	17	50	90	径向 - 12
			中心纵	610 ~ 760	690	16	45		0

(续)

容量 /MW	推荐用钢	取样方向	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ_4 (%)	ψ (%)	A_{KV} /J	FATT ₅₀ /℃
600	25CrNi4MoV (26Cr2Ni4MoV) (无中心孔转子)	纵、切、径	660 ~ 760	740	17	50	70	径 - 23
		中心纵	590 ~ 710	690	16	45		- 18

表 19-24 低压转子、主轴力学性能要求

容量 /MW	推荐用钢	取样方向	$\sigma_{0.2}(\sigma_s)$ /MPa	σ_b /MPa	$\delta_4(\delta_5)$ (%)	φ (%)	A_{KV} /J	FATT ₅₀ /℃	上平台冲击吸收功 /J
25 ~ 200	34CrMo1 34CrNi3Mo 34CrNi3Mo 30Cr2Ni4MoV 30Cr2Ni4MoV	纵/径 中纵	(345)	570	(17)/(14)	40/35	(40)/(31)		
		纵/径 中	690 660	790 ~ 910 760	(14)/(12) (12)	40/35 35	(50)/(45) (35)		
		纵/径 中	735 685	855 ~ 955 810	16 16	45 45	40 35		
		纵/径 中	760 720	860 ~ 970 830	16 16	45 45	40 34	/13 /27	
		纵/径 中	690 660	790 ~ 910 760	17 17	50 50	54 40	- 1 21	径 70 54
300 ~ 600	30Cr2Ni4MoV	纵/径 中	760 720	860 ~ 970 830	16 16	45 45	40 34	13 27	径 68 54
330 ^①	B30A—S (Ni3.5CrMoV)	纵切	700 700	800 ~ 950 800 ~ 950	14 14	32 45	67.5 67.5	15 - 5 - 45	(150mm 深) (60mm 深)
		纵切	539 ~ 686 539 ~ 686	686 686	16 15	45 40	(47) (39)	0(参考)	

注:1. $\sigma_b/\sigma_{0.2} \geq 1.11$; 2. 纵向 FATT₅₀ $\leq [\sigma_{0.2\text{实际}} - 720] \times 0.25$ 。

表 19-25 转子锻件力学性能实例

检号	钢种	规格 /MW	部位、 方向	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ (%)	ψ (%)	a_K /J·cm ⁻²	FATT ₅₀ /℃
96	34CrMo1A	12	纵向	480 ~ 550	620 ~ 710	17 ~ 22.5	58.5 ~ 64.5	U78 ~ 104	
			切向	490 ~ 510	640 ~ 650	19.5 ~ 20	59	U177 ~ 215	
23	34CrNi1Mo	25	纵向	540 ~ 566	725 ~ 745	18 ~ 22	61 ~ 64.5	U91 ~ 154	
			切向	501 ~ 560	706 ~ 714	20 ~ 21	58.5 ~ 61	U88 ~ 118	
			径向	498	684 ~ 696	19	57.5	—	
48	34CrNi3Mo	60	纵向	690 ~ 732	825 ~ 839	18 ~ 19	71.5 ~ 73	U143 ~ 243	
			切向	660 ~ 730	810 ~ 850	20.5 ~ 23	63 ~ 71	U217 ~ 245	
			径向	630 ~ 750	800 ~ 870	19 ~ 25	66 ~ 69	—	
116	25CrNi3MoV	100	纵向	660 ~ 680	760 ~ 770	20 ~ 22.5	72 ~ 75	U246 ~ 315	
			切向	690 ~ 700	780 ~ 810	18 ~ 20	70 ~ 73	U237 ~ 280	
			径向	660 ~ 690	760 ~ 770	18 ~ 20	75	—	
			中心纵	650 ~ 680	770 ~ 800	18 ~ 20	64.5 ~ 72	—	
232	26Cr2Ni4MoV	300	纵向	680 ~ 696	787 ~ 792	δ_4 24 ~ 26	74 ~ 74.5	V210 ~ 232	

(续)

检号	钢 种	规格 /MW	部位、 方向	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ (%)	ψ (%)	a_K /J·cm ⁻²	FATT ₅₀ /℃
232	26Cr2Ni4MoV	300	切向	665 ~ 702	776 ~ 815	23.5 ~ 27	69 ~ 74	V199 ~ 209	
			径向	688	794	20.5	76		< -80
			中心纵	666 ~ 685	790 ~ 802	25.5 ~ 26	69 ~ 72.5		-62
94	25Cr2NiMoV	125 轴头	纵向	644	771	22	75.5	V282 ~ 237	
			切向	620	745	23.5	75.5	V278 ~ 288	-51

表 19-26 300MW 低压转子实际力学性能

取样部位方向		$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ_4 (%)	ψ (%)	a_{KV} /J	FATT ₅₀ /℃	上平台冲击 吸收功 (水平)/J
冒口纵向		816	917	23	72.5	195		
水口纵向		813	911	23	73	216 199		
径向	x-1	870	950	21.5	70.5	193	-99	162
	x-2	803	902	21	65.5	170	-35	165
	x-3	854	936	22	66	192	-100	184
中心孔纵向	BB ₁	818	920	21.5	65.5	114 120	-13 -5 -7 } 横向	153
	BB ₂	818	923	20	64.5	86		150
		820	922	21	62.5	109		
	BB ₃	806	906	22	66	157		152
						153		

2. 高中压转子热处理

(1) 化学成分(表 19-27)

(2) 冷却曲线(图 19-105, 图 19-106, 表 19-28)

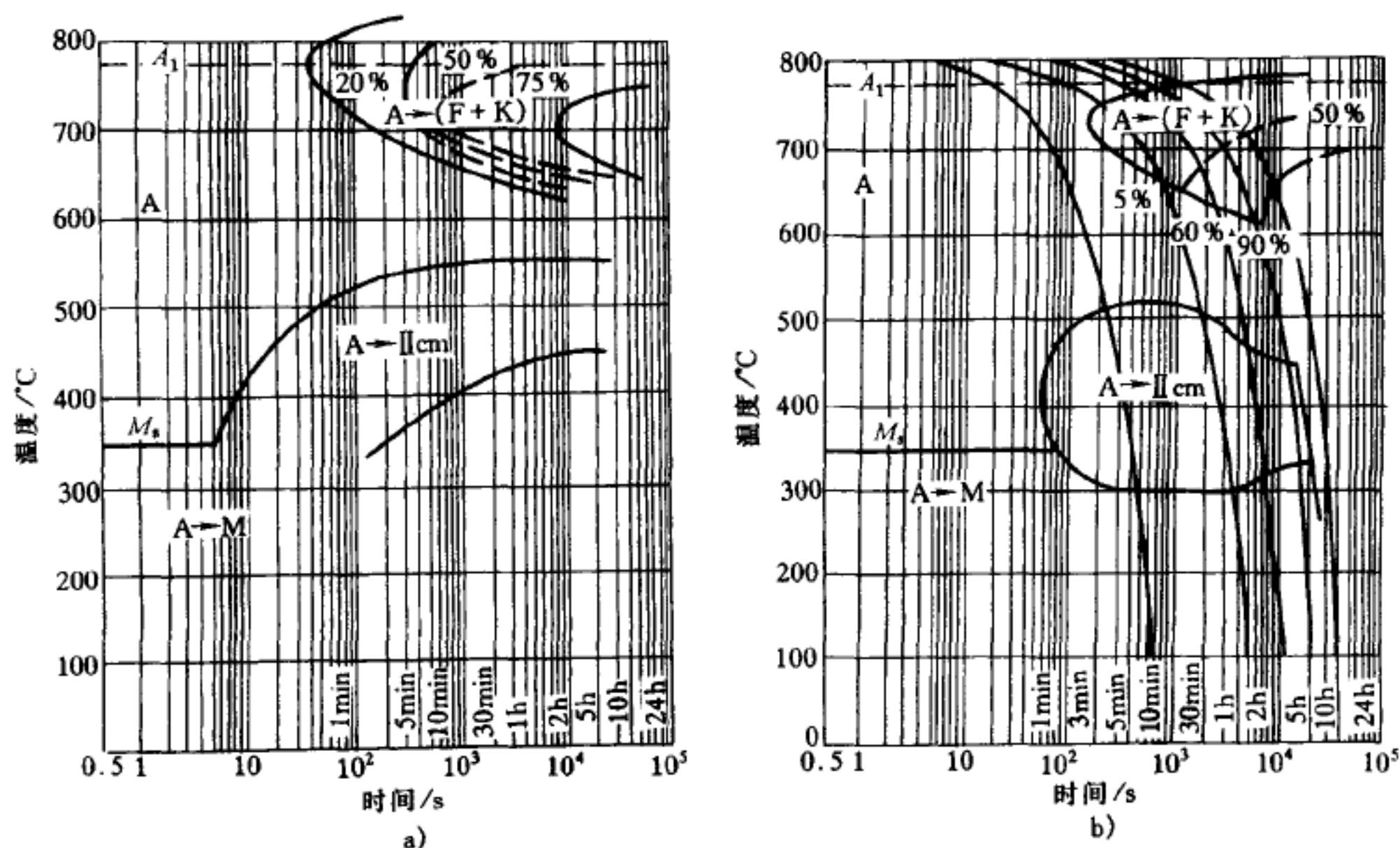


图 19-105 30Cr2MoV 钢奥氏体等温转变图和连续冷却转变图曲线

a) 等温转变图 b) 连续冷却转变图(图中 II cm 为中间转变产物)

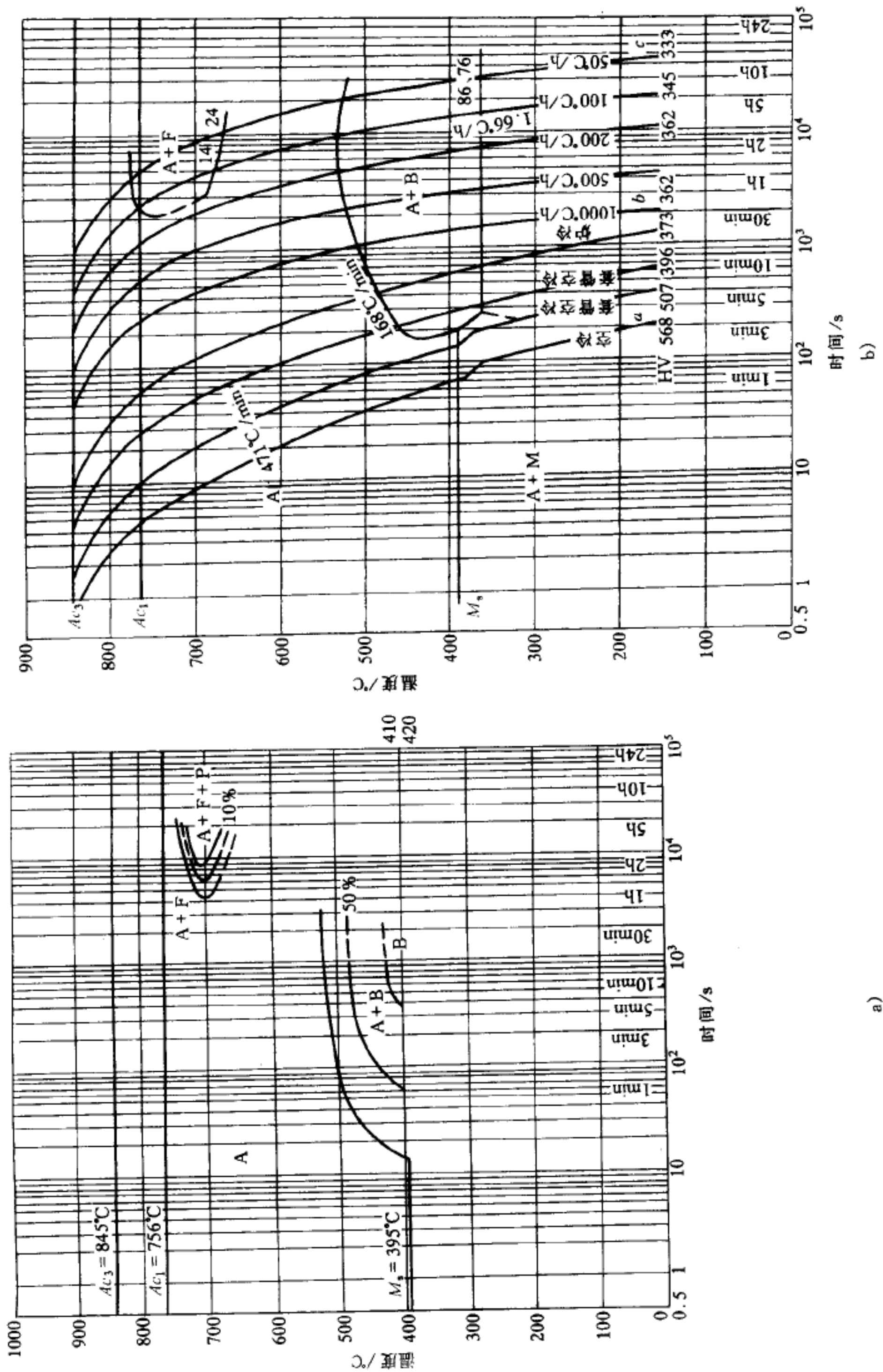


图 19-106 30Cr1 Mo1V 钢的等温转变图和连续冷却转变图

化学成分(质量分数)(%) C0.26、Si0.20、Mn0.81、P0.014、S0.13、Cr1.09、Mo1.10、V0.25

a) 等温转变图(一重) b) 连续冷却转变图(一重)

a. 原始状态: 铸态; 奥氏体化: 950°C, 20min; 晶粒度: 8~7 级 b. 原始状态: 锻态; 奥氏体化: 950°C, 10min; 晶粒度: 7 级

表 19-28 几种钢的临界点

钢 号	Ac ₁	Ac ₃	Ar ₁	Ar ₃	Ms	Mf	Bs
34CrMo	—	—	—	—	—	—	—
30Cr2MoV	770 ~ 805	840 ~ 880	—	—	—	—	—
28CrNiMoV	755	835	—	—	410	—	—
30Cr1Mo1V	763	864	652	727	—	—	510 (一重)
	765	845	—	—	395	—	(北京钢院)
	746	801	—	—	329	—	493 (西屋)

(3) 热处理工艺(图 19-107 和图 19-108)

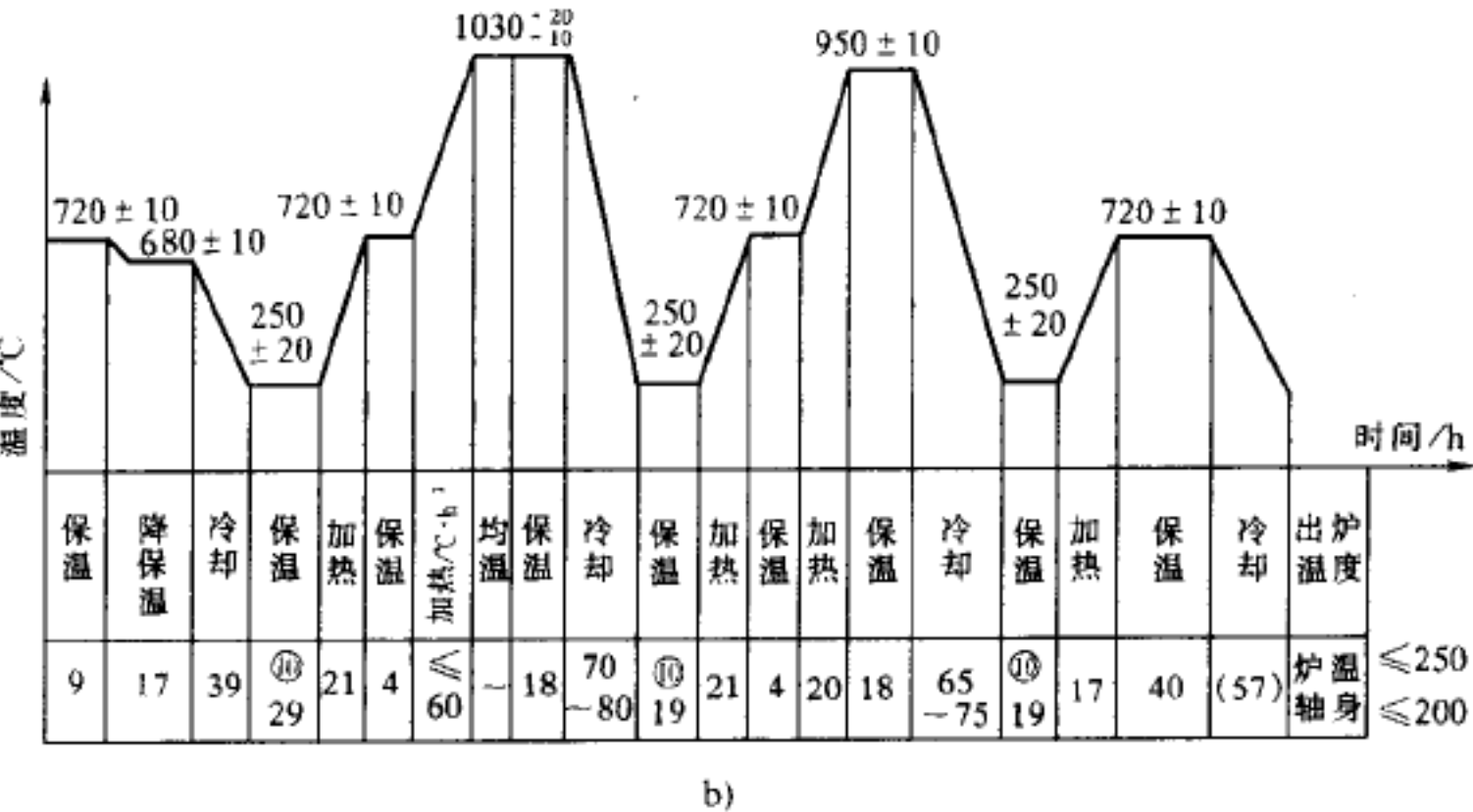
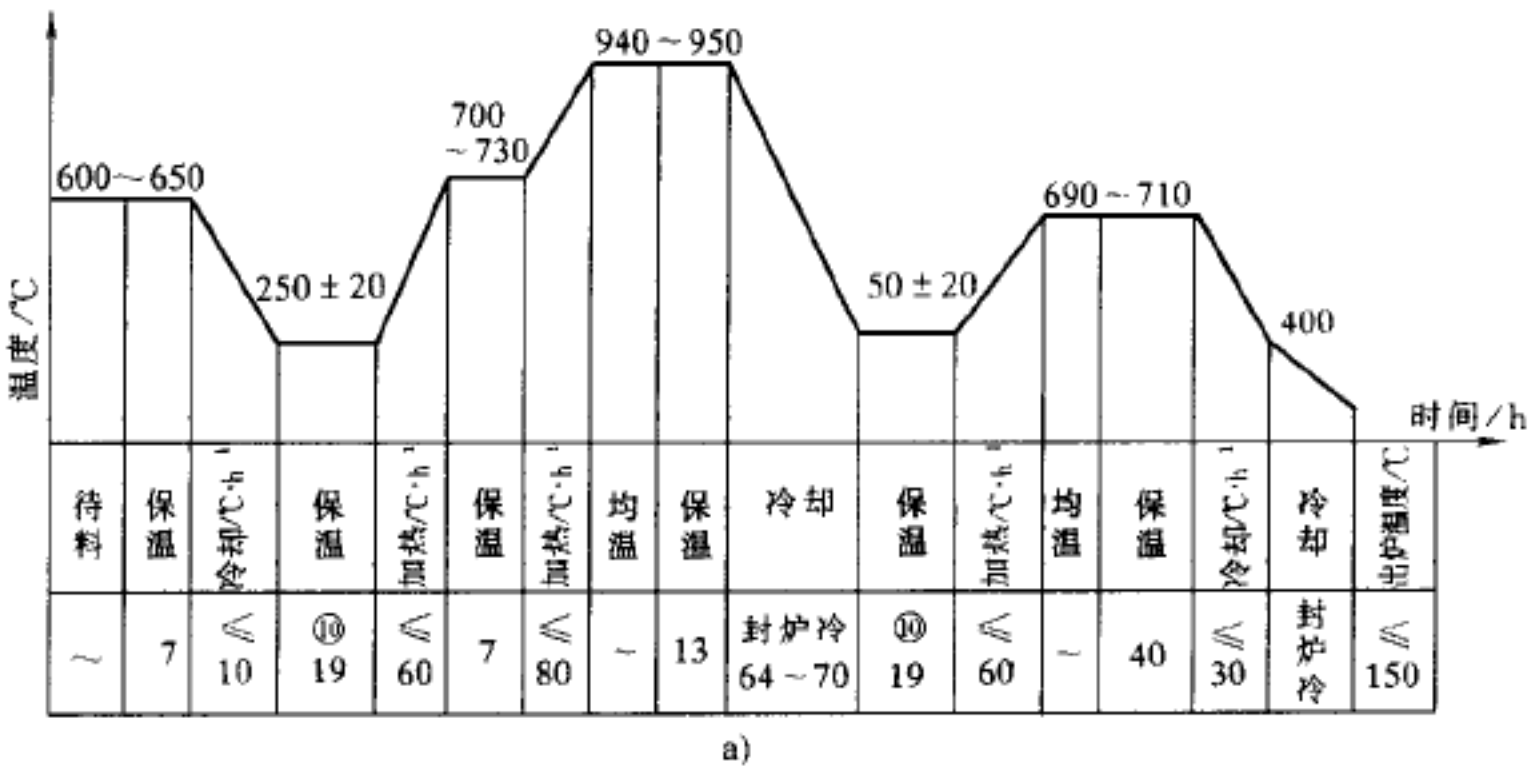


图 19-107 国内高、中压转子的预备热处理工艺曲线

a)30Cr2MoV 钢预备热处理工艺 b)30Cr1MoV 钢预备热处理工艺

图中粗黑线部分以敷电偶温度为准,圈内时间为热电偶到温后的时间,括弧内时间供参考

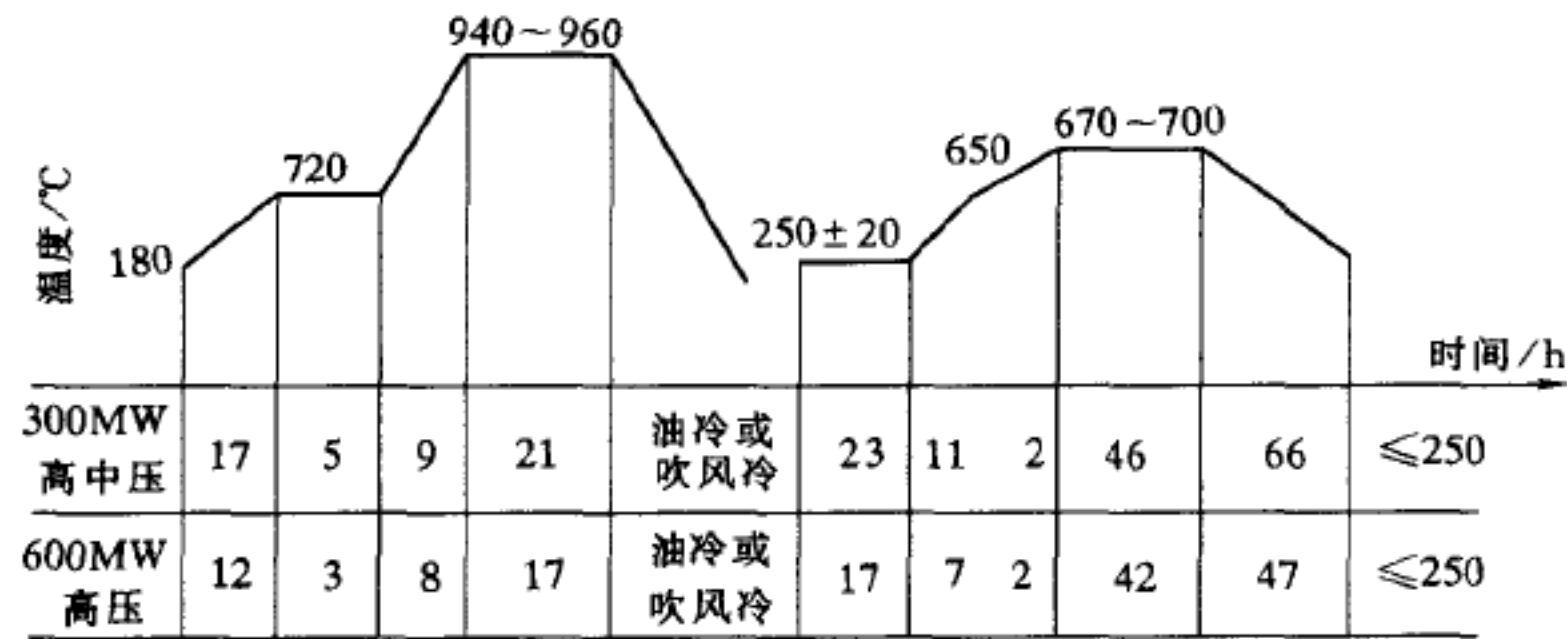


图 19-108 300、600MW 高中压转子性能热处理工艺

(4) 力学性能(表 19-29 ~ 表 19-44)

表 19-29 30Cr2MoV 钢 30 万 kW 中压转子的力学性能

取 样 部 位	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ (%)	ψ (%)	A_K /J	FATT /°C
冒口端纵向	595	745	21	70	139 132.5	
水口端纵向	540	710	22	71	156 150	
本 体 径 向	550	710	21	69	185 151	100
	545	710	21	70	131 147.5	
	585	740	20	70	144 112.5	
	575	730	21	68	131 127.5	

表 19-30 30Cr1Mo1V 钢 20 万 kW 高压转子的力学性能

取 样 部 位	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ (%)	ψ (%)	A_K /J	FATT /°C
冒口端纵向	600	765	22	67	172.5 187.5	
水口端纵向	595	760	20	65	177.5 165	
本 体 径 向	610	765	18	65	149 147.5	84
	605	765	20	67	175 187.5	
中心孔芯棒	605	780	21	62	177.5 156	100
	600	780	21	62	177.5 160	

表 19-31 对力学性能、高温性能的要求

推 荐 钢 号	取 样 方 向	σ_s ($\sigma_{0.2}$) /MPa	σ_b /MPa	δ_4 (δ_5) (%)	ψ (%)	a_K /J		FATT ^① ₅₀ /℃	上平台	高 温 性 能		
						U	V		能量/J			
34CrMo	纵	350	580	(17)	40	39		冷弯 $d=4a$ 180°		试 验 温 度 /℃	持 久 强 度 σ_{10^5} /MPa	蠕 变 强 度 σ_U^t /MPa
	切	320	550	(13)	32	31						
34CrMo1	纵	(345)	570	(17)	45	40						
	径	(345)	570	(14)	35	31						
30Cr2MoV	轴端 纵向	490	640	(15)	40	50						

(续)

推荐钢号	取样方向	σ_s ($\sigma_{0.2}$) /MPa	σ_b /MPa	$\delta_4(\delta_5)$ (%)	ψ (%)	a_K/J		FATT ₅₀ ^① /℃	上平台 能量/J	高温性能		
						U	V			试验温度 /℃	持久强度 σ_{10^5} /MPa	蠕变强度 σ'_U /MPa
25CrNiMoV	本体径向	490	640	(11)	35	45		85				
	中心纵	450	600	(13)	35	40		100				
30Cr1Mo1V 25~200MW	轴端纵向	590~690	720	15	40		8			500	216	137
	本体径向	590~690	720	15	40		8	116		525	167	118
	中心纵向	550	690	15	40		7	121		注:30Cr2MoV σ_{10^5} 最低允许 147 平均值 167		
30Cr1Mo1V 300、600MW	轴端纵向	590~690	720	15	40		8		75			
	本体径向	590~690	720	15	40		8	116	75	538 应力 199MPa 时 ≥5000h		
	中心纵向	550	690	15	40		7	121	47	510 应力 314MPa 时 ≥5000h		

① 当生产工艺稳定后可以不做。

表 19-32 34CrMo 高温短时性能(原试样 212~223HBW)

力学性能	20℃	200℃	300℃	400℃	450℃	500℃	550℃	600℃
$\sigma_{0.2}/MPa$	421~510	421	392	392	392	353	333	235
σ_b/MPa	608~706	608	588	549	519	441	392	255
$\delta_5(\%)$	17~22	16	16	17	16	18	18	24
$\psi(\%)$	54~61	52	51	64	68	74	75	85
a_K/J	39~78	86	63	63	63	47	47	55
$E_s/\times 10^{-4}/MPa$	21.56	—	19.6	18.62	18.62	18.62	—	—

表 19-33 34CrMo 高温持久强度

持久强度	450℃	475℃	500℃	525℃	550℃
σ_{10^3}/MPa	363	—	274	—	176
σ_{10^4}/MPa	294	255	206	157	118
σ_{10^5}/MPa	235	196	147	108	78

表 19-34 34CrMo 高温蠕变极限

蠕变极限	450℃	500℃	550℃
$\sigma_{1/1000}/MPa$	—	—	118
$\sigma_{1/10000}/MPa$	(157)	(83)	59(49)
$\sigma_{1/100000}/MPa$	127(103)	54(49)	27(25)

表 19-35 30CrNi3Mo 高温短时性能(原试样 293 ~ 311HBW)

力学性能	20℃	100℃	300℃	400℃	450℃	500℃	550℃	600℃
$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	853	833	755	686	647	627	539	363
σ_b/MPa	1009	980	911	823	755	686	578	392
$\delta_5(\%)$	15	14	9	15	15	15	18	18
$\psi(\%)$	51	46	36	58	64	68	77	79
a_K/J	71	78	78	78	63	55	55	118
$E/\times 10^{-4}/\text{MPa}$	20.58	20.58	19.6	—	—	17.64	—	—
$G/\times 10^{-4}/\text{MPa}$	7.84	7.84	6.86	—	—	5.88	—	—

表 19-36 30CrNi3Mo 高温持久强度

持久强度	450℃	500℃	550℃	575℃
σ_{10^3}/MPa	411	225 ~ 294	118	98
σ_{10^4}/MPa	323	108 ~ 147	69	49
σ_{10^5}/MPa	225	59 ~ 78	39	29

表 19-37 30CrNi3Mo 高温蠕变极限

蠕变极限	450℃	500℃	550℃
$\sigma_{1/10000}/\text{MPa}$	294	98	29
$\sigma_{0.5/10000}/\text{MPa}$	235	69	—
$\sigma_{0.2/10000}/\text{MPa}$	196	49	—
$\sigma_{1/100000}/\text{MPa}$	157	29	10
$\sigma_{0.5/100000}/\text{MPa}$	127	20	—

表 19-38 30Cr2MoV 高温短时性能

力学性能	20℃	450℃	500℃	550℃	备 注
$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	519 ~ 578	431 ~ 480	421 ~ 461	402 ~ 441	资料来源:俄罗斯 热处理: 970 ~ 990℃空冷 + 930 ~ 950℃空冷 + 680 ~ 700℃回火 取样部位:轴身切向 转子 $\phi 840 \sim \phi 1000$
σ_b/MPa	676 ~ 725	549 ~ 578	500 ~ 539	461 ~ 480	
$\delta_5(\%)$	15 ~ 19	16 ~ 18	17 ~ 18	17 ~ 21	
$\psi(\%)$	41 ~ 64	59 ~ 63	64 ~ 68	69 ~ 73	
a_K/J	16 ~ 78	94	78 ~ 94	78 ~ 86	

表 19-39 30Cr2MoV 高温持久强度

持久强度	500℃	525℃	535℃	550℃	575℃	备 注
σ_{10^3}/MPa	294 ~ 343	274 ~ 343	—	265	196 ~ 225	资料来源:俄罗斯
σ_{10^4}/MPa	255 ~ 304	225 ~ 274	—	196	137 ~ 157	
σ_{10^5}/MPa	216 ~ 255	176 ~ 216	≥ 147	≥ 137	98 ~ 118	
σ_{10^5}/MPa		216				资料来源:一重碱平 + VCD 切向环
σ_{10^5}/MPa		147				资料来源: 一重酸平、心部

表 19-40 30Cr2MoV 高温蠕变极限

蠕变极限	480℃	500℃	525℃	535℃	550℃	备 注
$\sigma_{0.2/10000}/\text{MPa}$	255	196	157	—	—	资料来源:俄罗斯
$\sigma_{1/100000}/\text{MPa}$	216	137 ~ 147	118	≥ 98	≥ 88	
$\sigma_{0.5/10000}/\text{MPa}$	176	108	98	—	—	
$\sigma_{1/100000}/\text{MPa}$			142			资料来源:一重碱平 + VCD 切向环

表 19-41 28CrNiMoV 高温短时性能

力学性能	20℃	300℃	400℃	500℃	525℃	550℃
$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	597 ~ 602.7	553 ~ 560	511 ~ 514	453 ~ 460	445 ~ 465	423 ~ 444
σ_b/MPa	774 ~ 779	691 ~ 697	645 ~ 647	534 ~ 539	509 ~ 520	480 ~ 490
$\delta_5(\%)$	21.6 ~ 23.6	17.6 ~ 18.0	20 ~ 21.6	26 ~ 26.8	22.8 ~ 25.6	23.6 ~ 27.6
$\psi(\%)$	63.8 ~ 65.0	63.7 ~ 64	64 ~ 70.8	78.8 ~ 80.6	82.3 ~ 82.3	85.5 ~ 86.2
A_{KV}/J	76 ~ 77			88 ~ 105.9		
	19 ~ 43			105.9 ~ 117.7		
FATT ₅₀	切	52				
/℃	中	84				

表 19-42 28CrNiMoV 持久强度

试验温度	σ_{10^5}/MPa (油冷 700℃回火)		σ_{10^5}/MPa (风冷 700℃回火)	
	中 心	切 向	中 心	切 向
500℃	231.28			
525℃	180.32	191.10	234.38	206.92
550℃	163.66			
525℃	176	176		

表 19-43 28CrNiMoV 高温蠕变极限

试验温度	部位	蠕变极限 $\sigma_{10^{-5}}/\text{MPa}$		
		风冷 + 700℃回火	油冷 + 700℃回火	鼓风 + 油冷 + 700℃回火
525℃	中心	121.26.5	98.98	
	切		121.52	100(一重)

表 19-44 30Cr1Mo1V 钢高温性能

数 据 来 源	热 处 理	高 温 性 能
第一重型机器厂 300MW 中压转子 (上海成套所作)	鼓风 680℃回火	$\sigma_{10^5}^{500} 236\text{MPa}$ $\sigma_{10^5}^{525} 201\text{MPa}$ $\sigma_{10^5}^{525} 165\text{MPa}$
第二重型机器厂 600MW 高压转子	鼓风 670℃回火	$\sigma_{10^5}^{427} 317.16 \sim 468.84\text{MPa}$ $\sigma_{10^5}^{432} 213.74 \sim 317.16\text{MPa}$ $\sigma_{10^5}^{525} 124.10 \sim 186.16\text{MPa}$ $\sigma_{10^5}^{538} 110.32 \sim 165.47\text{MPa}$ $\sigma_{10^5}^{427} 282.64 \sim 441.26\text{MPa}$ $\sigma_{10^5}^{482} 182.71 \sim 289.58\text{MPa}$ $\sigma_{10^5}^{525} 110.32 \sim 179.27\text{MPa}$ $\sigma_{10^5}^{538} 99.97 \sim 158.58\text{MPa}$

3. 叶轮热处理(表 19-45 ~ 表 19-48,图 19-109 ~ 图 19-112)

表 19-45 叶轮用钢的化学成分

钢 号	性能级别	化学成分(质量分数)(%)									
		C	Mn	Si ^①	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
20CrNi3MoV	1、2、3 级	≤0.23	≤0.70	0.15 ~ 0.35	≤0.015	≤0.015	2.00 ~ 4.00	0.75 ~ 2.00	0.20 ~ 0.70	≥0.05	≤0.20
30CrNi3MoV	4、5 级	≤0.35	≤0.70	0.15 ~ 0.35	≤0.015	≤0.015	2.00 ~ 4.00	0.75 ~ 2.00	0.20 ~ 0.70	≥0.05	≤0.20
35CrNi3MoV	6、7、8、9 级	≤0.40	≤0.70	0.15 ~ 0.35	≤0.015	≤0.015	2.00 ~ 4.00	0.75 ~ 2.00	0.20 ~ 0.70	≥0.05	≤0.20
30Cr1Mo1V	10 级	0.27 ~ 0.37	0.70 ~ 1.00	≥0.20	≤0.015	≤0.015	≤0.50	0.85 ~ 1.25	1.00 ~ 1.50	0.20 ~ 0.30	≤0.20

① 若采用真空碳脱氧,则硅含量上限应为 $w_{Si}0.10\%$ 。

表 19-46 叶轮的力学性能要求

级 别	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	$\delta(\%)$	$\psi(\%)$	A_{KV}/J	FATT/ $^{\circ}\text{C}$
1	555 ~ 690	690	20	50	69	-18
2	620 ~ 760	725	19	50	69	-18
3	690 ~ 825	760	18	47	59	-18
4	760 ~ 895	830	17	45	59	-18
5	825 ~ 965	900	16	43	54	-12
6	895 ~ 1035	965	15	43	54	-12
7	965 ~ 1105	1035	14	40	39	10
8	1035 ~ 1175	1105	13	37	39	10
9	1105 ~ 1240	1170	12	35	34.5	21
10	620 ~ 725	725	15	30	13.5	93

注:抗拉试样直径为 12.5mm,标距为 50mm。

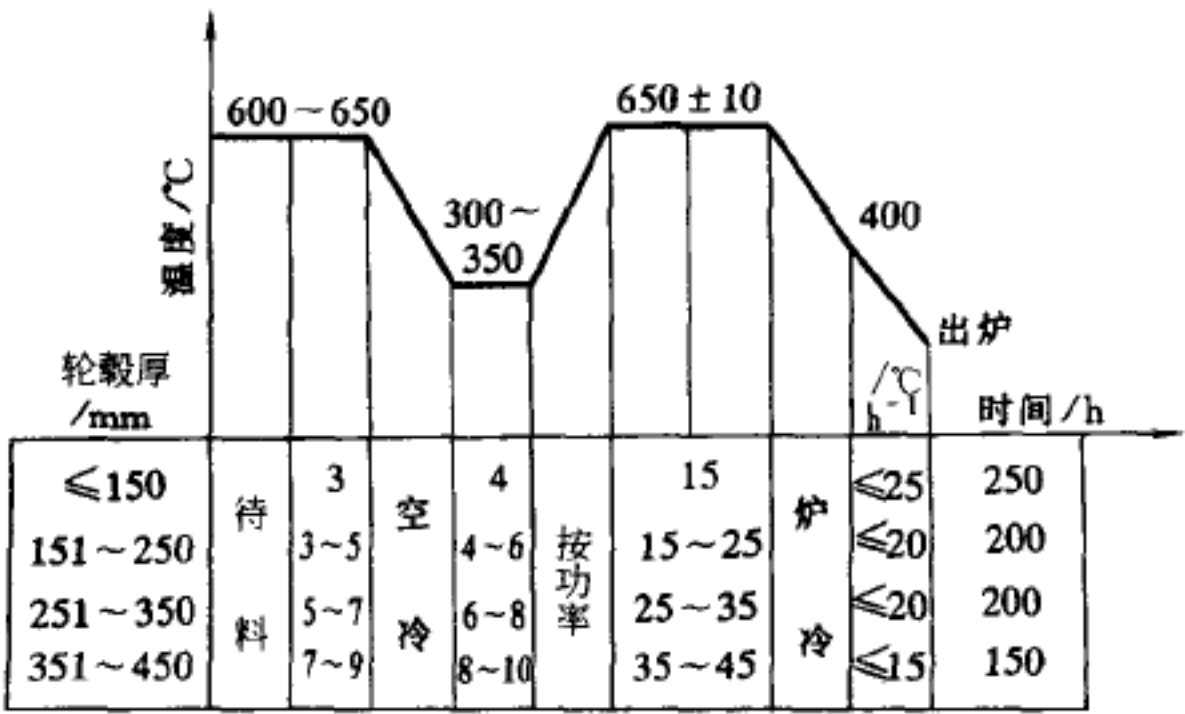


图 19-109 24CrMoV、35CrMoV 钢叶轮的锻后热处理工艺

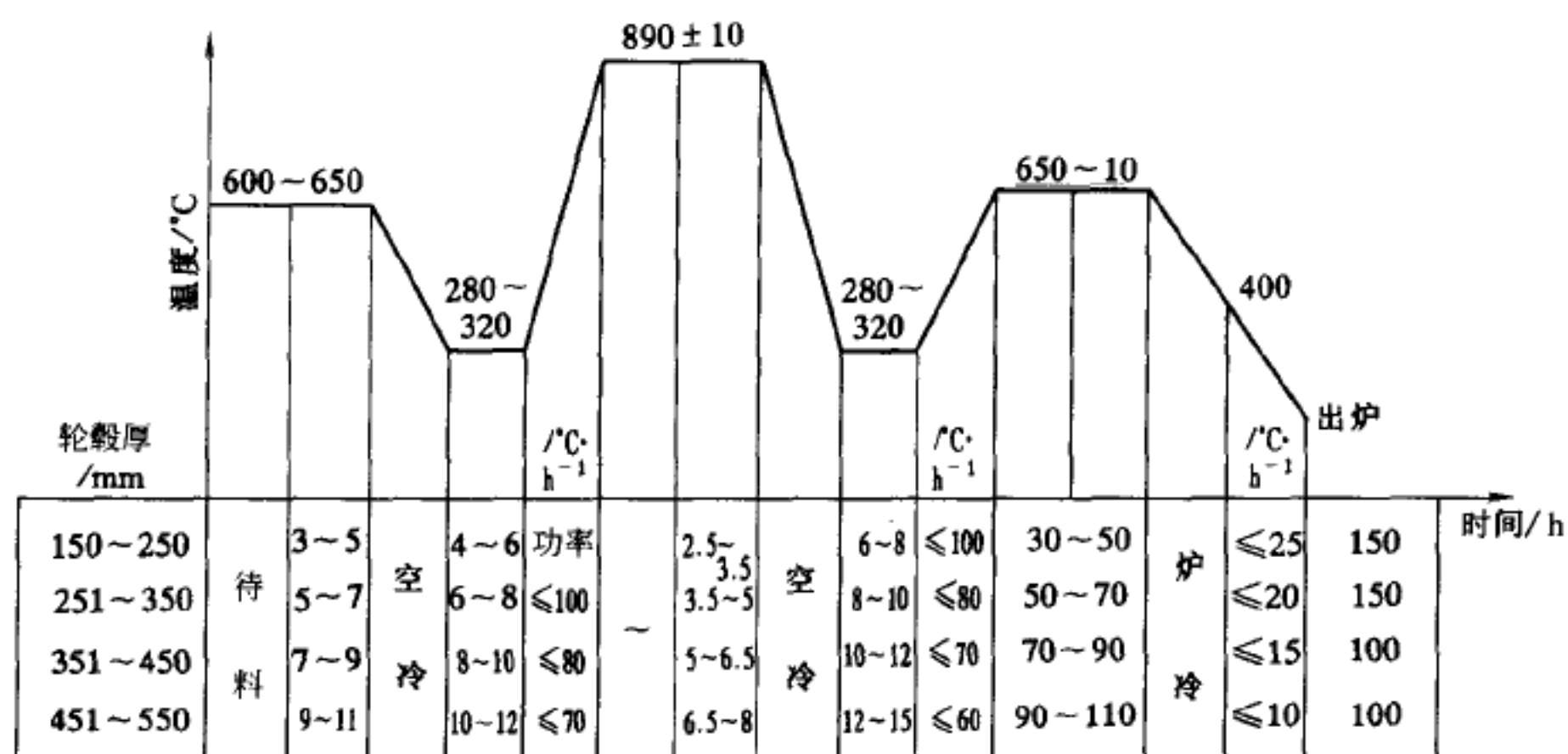


图 19-110 34CrNi3Mo、26CrNi3MoV 钢叶轮的锻后热处理工艺

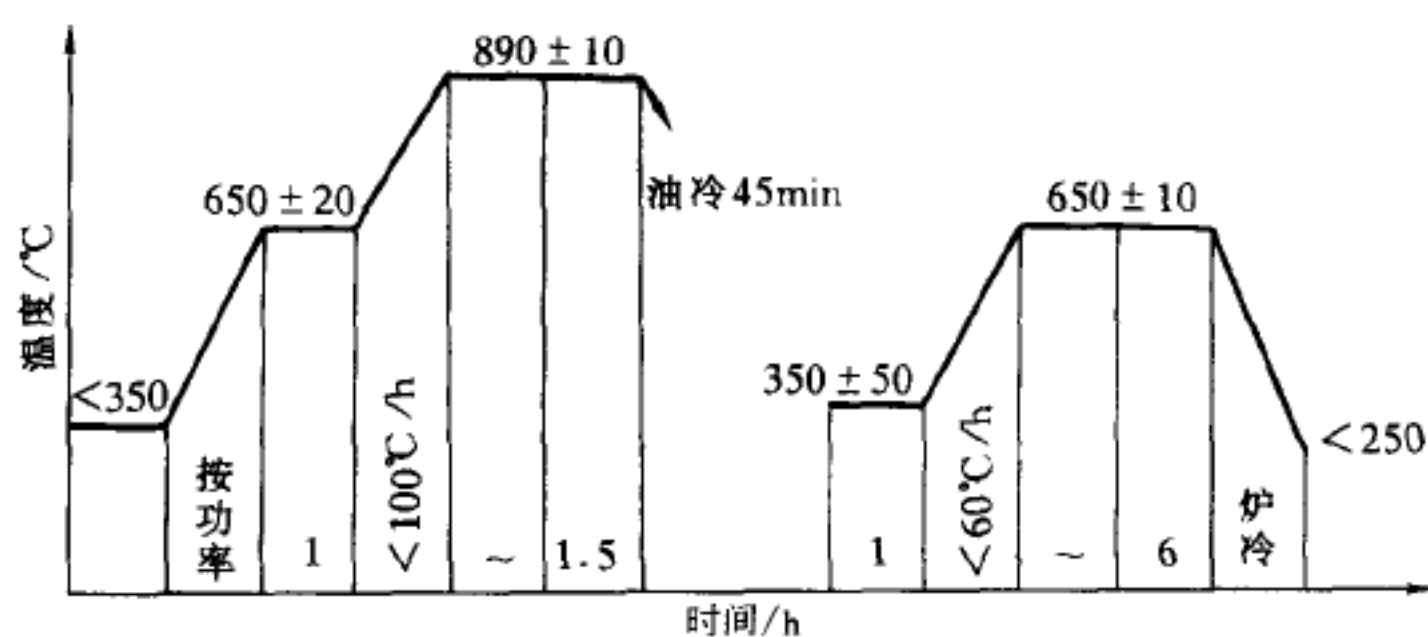


图 19-111 35CrMoV 钢叶轮的调质热处理工艺

表 19-47 35CrMoV 钢叶轮调质后的力学性能

序 号	尺寸/mm	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ (%)	ψ (%)	a_K /J·cm ⁻²
1	φ1121 × 160	650	821	21	53	76,68
2	φ1090 × 120	745	895	16	61	105,118
3	φ1090 × 100	800	905	16	54	98,78

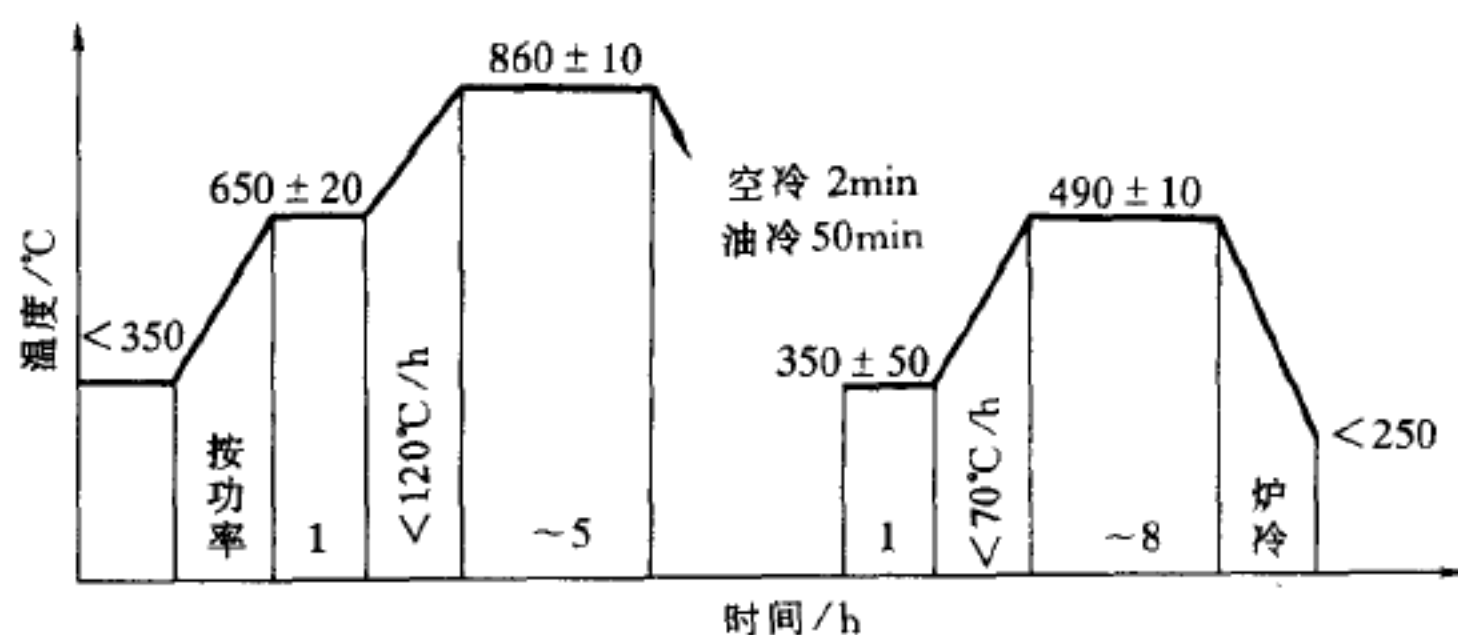


图 19-112 26CrNi3MoV 钢叶轮的调质热处理工艺

表 19-48 26CrNi3MoV 钢叶轮调质后力学性能

序 号	尺寸/mm	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ (%)	ψ (%)	a_K /J·cm ⁻²
1	$\phi 1076 \times 140$	735	830	22	70	225,205
2	$\phi 1076 \times 140$	695	765	23	70	230,228

注:按 JB1266 标准试验及验收。

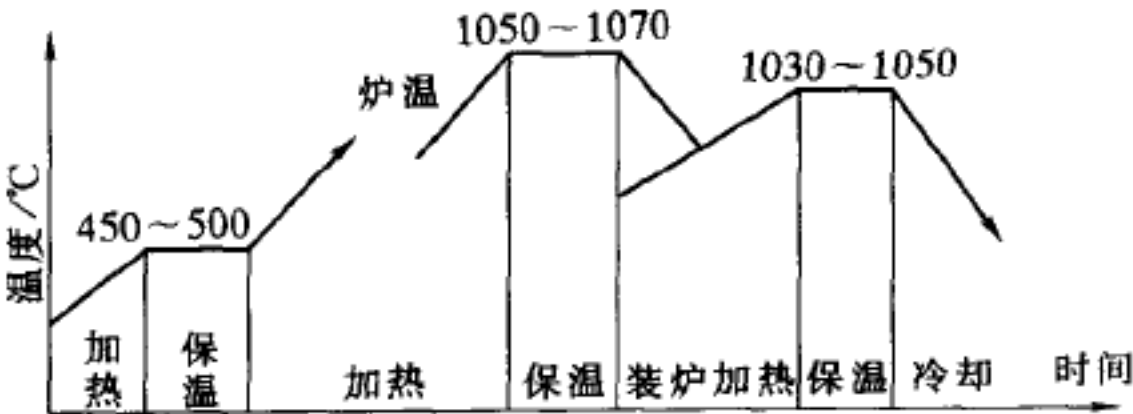
4. 护环热处理(表 19-49 和表 19-50,图 19-113 ~ 图 19-115)

表 19-49 护环钢的化学成分

MW	钢 号	化学成分(质量分数)(%)										
		C	Si	Mn	P	S	Cr	W	N	Ni	Mo	Al
50 ~ 200	50Mn18Cr5	0.40 ~ 0.60	0.30 ~ 0.80	17.00 ~ 19.00	≤ 0.060	≤ 0.025	3.50 ~ 6.00					
	50Mn18Cr5N	0.40 ~ 0.60	0.30 ~ 0.80	17.00 ~ 19.00	≤ 0.060	≤ 0.025	3.50 ~ 6.00		≥ 0.08			
	50Mn18Cr4WN	0.40 ~ 0.60	0.30 ~ 0.80	17.00 ~ 19.00	≤ 0.060	≤ 0.025	3.50 ~ 6.00	0.70 ~ 1.20	≥ 0.08			
	1Mn18Cr18N	≤ 0.12	≤ 0.80	17.50 ~ 20.00	≤ 0.050	≤ 0.015	17.50 ~ 20.00		≤ 0.45	Ni、Mo、V、W 分析供参考		≤ 0.040
300 ~ 600	1Mn18Cr18N	≤ 0.12	≤ 0.80	17.50 ~ 20.00	≤ 0.050	≤ 0.015	17.50 ~ 20.00		≥ 0.45	Ni、Mo、V、W 分析供参考		≤ 0.040

表 19-50 护环钢的力学性能

MW	护环 级别	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ_4 (%)	ψ (%)	试 验 温 度	A_{KV} /J	导磁率 μ	推 荐 用 钢
50 ~ 200	I	760	895	25	35	20 ~ 27 当磁场强度为 1.6×10^4 A/m 时 $\leq 13.8 \times 10^{-7}$	—	≤ 1.1	50Mn18Cr5
	II	825	965	20	30		—	≤ 1.1	
	III	900	1025	20	30		—	≤ 1.1	
	IV	790 ~ 970	830	21	60	$\sigma_{0.2}$ 、 σ_b δ_4 、 ψ :95 ~ 105	122	≤ 1.1	1Mn18Cr18N
	V	980 ~ 1030	900	19	57		102	≤ 1.1	
300 ~ 600	I	970 ~ 1100	970	17	55	A_{KV} :20 ~ 27	102	当磁场强度 为 0.8×10^4 A/m 时 $\leq 13.2 \times 10^{-7}$	1Mn18Cr18N
	II	1030 ~ 1170	1030	15	53		102		
	III	1070 ~ 1210	1070	15	52		102		



壁厚 B/mm	加热/℃·h ⁻¹	保温	加 热	保 温	装入护环并加热	保 温	冷却时间/h
$B \leq 60$	≤ 80	> 3	转入高温炉空烧	> 1	尽快但 < 1.5	1.5	水冷至表面 < 50℃
$60 < B < 110$	≤ 80	> 4	转入高温炉空烧	> 1	尽快但 < 1.5	2	
$B \geq 110$	≤ 80	> 4	转入高温炉空烧	> 1	尽快但 < 1.5	2.5	

图 19-113 护环固溶处理工艺

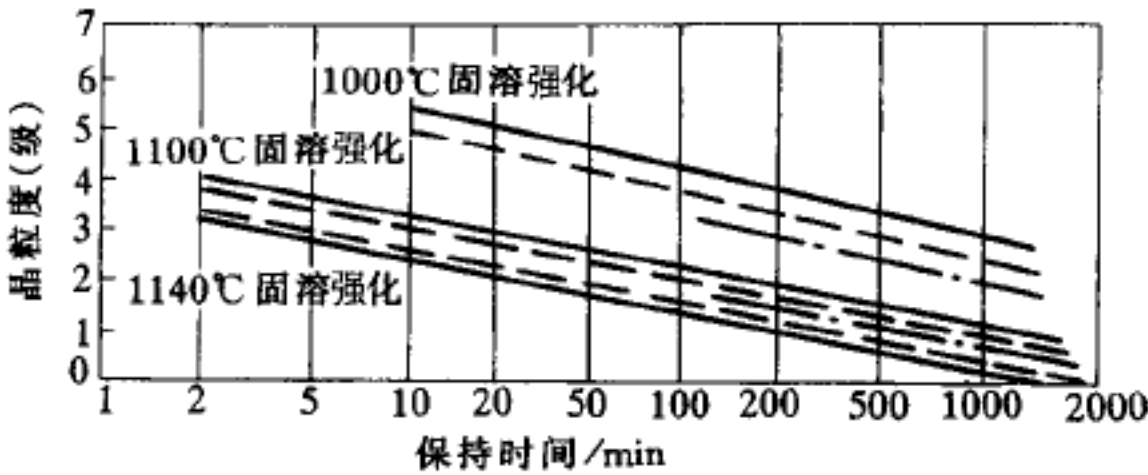


图 19-114 固溶温度、时间和晶粒度的关系
实线、虚线、点划线为不同批次的试验结果

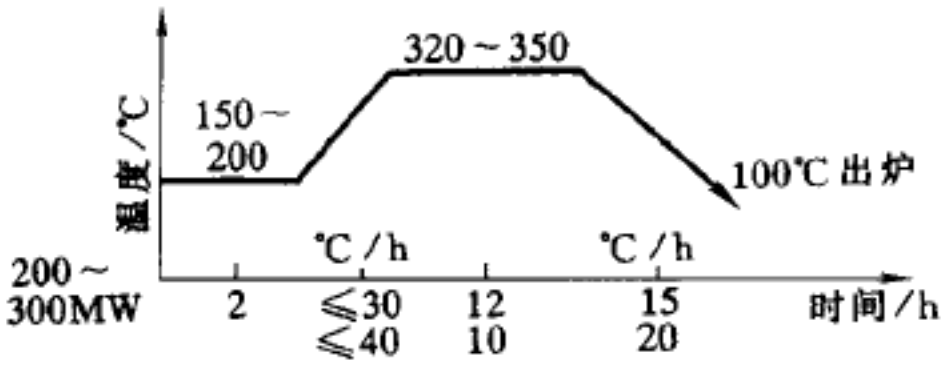


图 19-115 护环消除应力处理工艺

19.3 大型冷轧辊用钢化学成分、热处理工艺和性能

1. 化学成分(表 19-51)

表 19-51 冷轧工作辊常用钢号及其化学成分

钢 号	化学成分(质量分数)(%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	其他
9Cr2	0.85 ~ 0.95	0.25 ~ 0.45	0.20 ~ 0.35	≤0.025	≤0.025	1.70 ~ 2.10		
9Cr2Mo	0.85 ~ 0.95	0.25 ~ 0.45	0.20 ~ 0.35	≤0.025	≤0.025	1.70 ~ 2.10	0.20 ~ 0.40	
9Cr2W	0.85 ~ 0.95	0.25 ~ 0.45	0.20 ~ 0.35	≤0.025	≤0.025	1.70 ~ 2.10		W 0.30 ~ 0.60
9Cr2MoV	0.83 ~ 0.90	0.20 ~ 0.40	0.20 ~ 0.40	≤0.025	≤0.025	1.60 ~ 1.90	0.20 ~ 0.35	V 0.08 ~ 0.12
9Cr3Mo	0.85 ~ 0.95	0.25 ~ 0.45	0.20 ~ 0.35	≤0.025	≤0.025	2.50 ~ 3.50	0.20 ~ 0.40	

2. 热处理工艺(图 19-116 ~ 图 19-123,表 19-52 ~ 表 19-58)

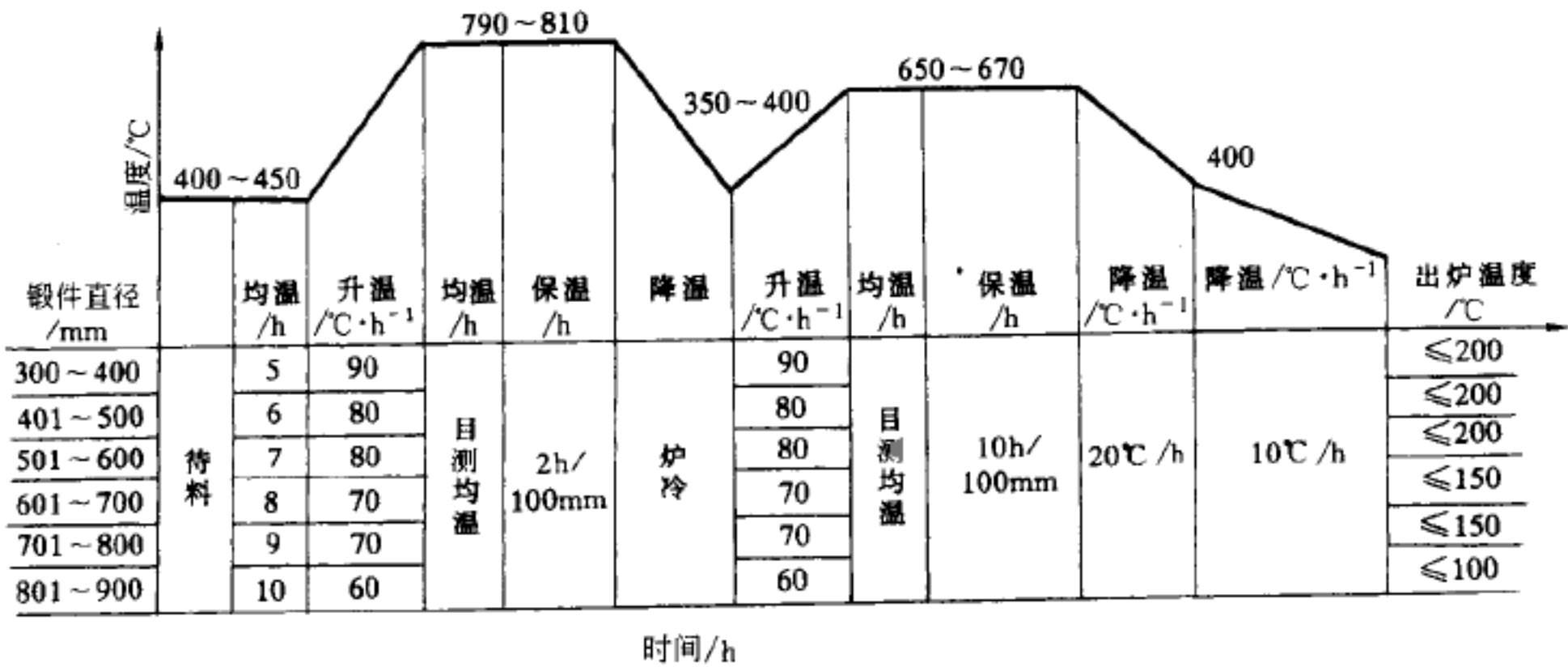


图 19-116 冷轧工作辊锻后热处理工艺规范例一

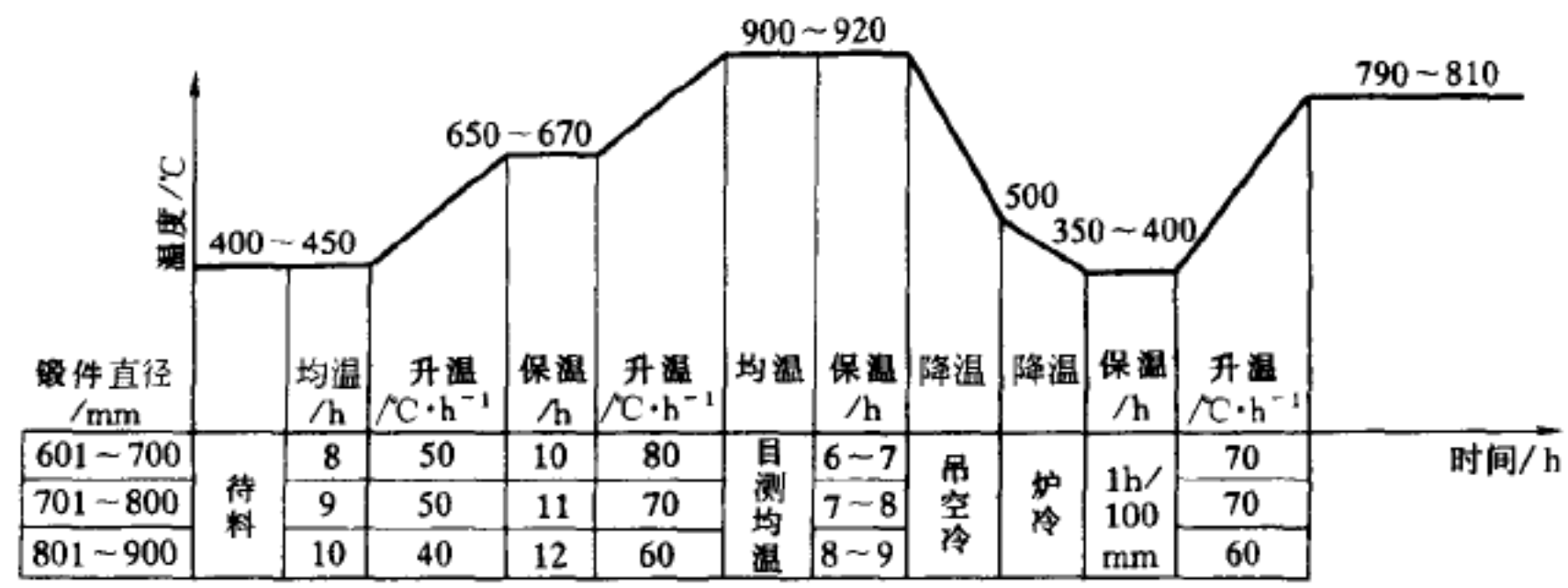


图 19-117 冷轧工作辊锻后热处理工艺规范例二

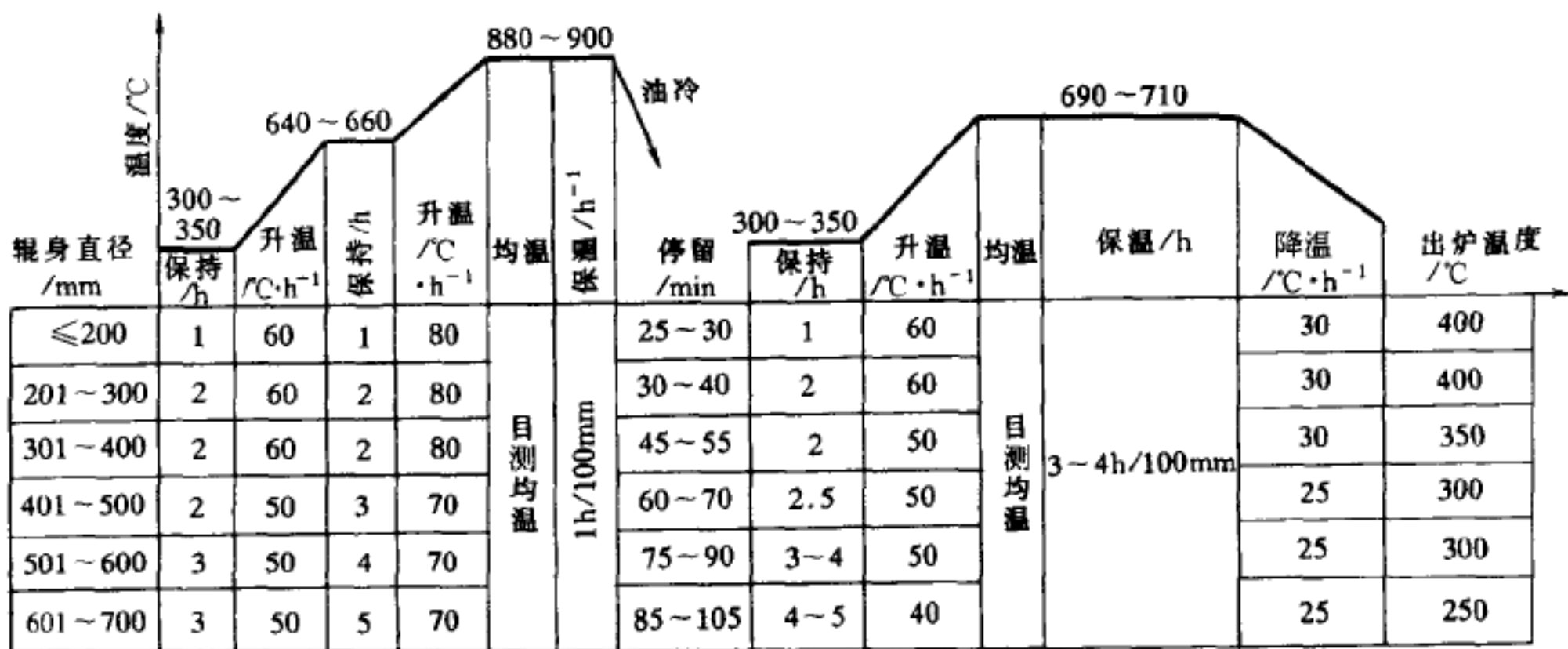


图 19-118 9Cr2Mo 冷轧工作辊调质工艺规范

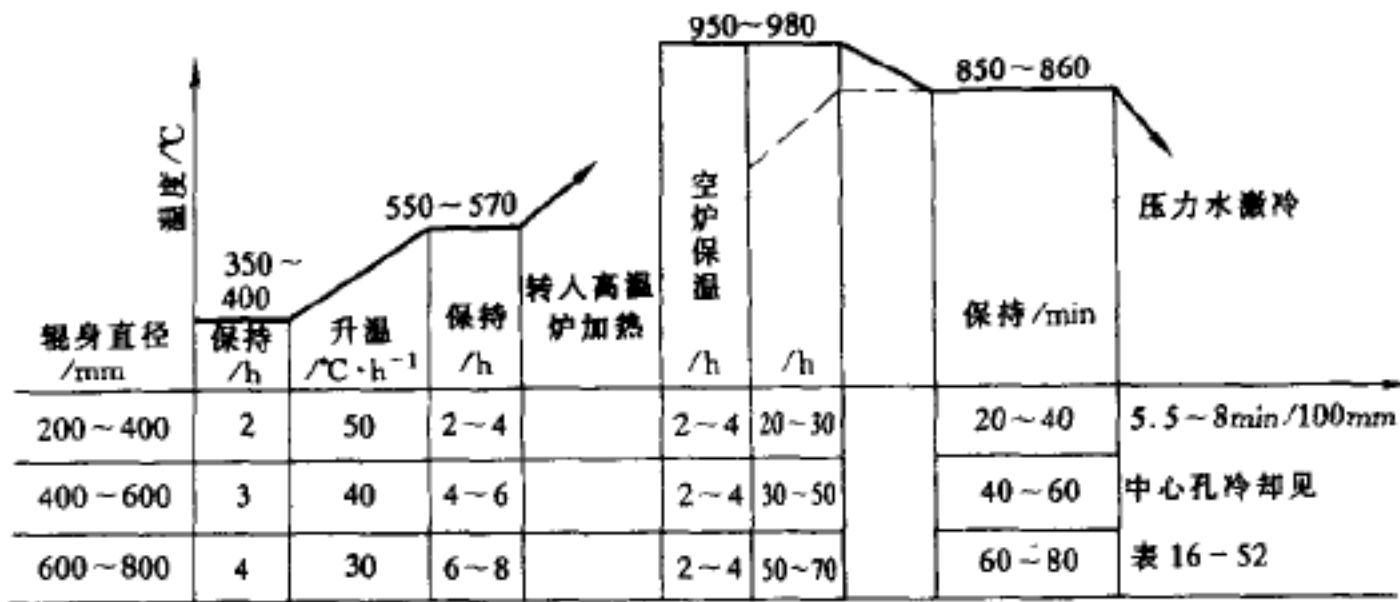


图 19-119 冷轧工作辊整体淬火工艺规范(虚线为辊身表面温度,即表面加热到 850~860℃以后应立即降低炉温)

表 19-52 冷轧工作辊中心孔冷却时间

辊身直径/mm	中心孔通水规范/min	备 注
200	2/3, 3/x	分子为通水时间 分母为停止通水时间 x 为停水后不再通水
250	2/3, 4/x	
300	2/4, 3/3, 3/x	
400	3/6, 4/5, 4/x	
500	3/5, 3/4, 4/3, 3/x	
501~600	3/5, 4/4, 5/3, 5/x	
601~700	3/6, 4/5, 5/3, 6/x	
701~800	3/5, 4/6, 5/5, 5/5, 4/x	

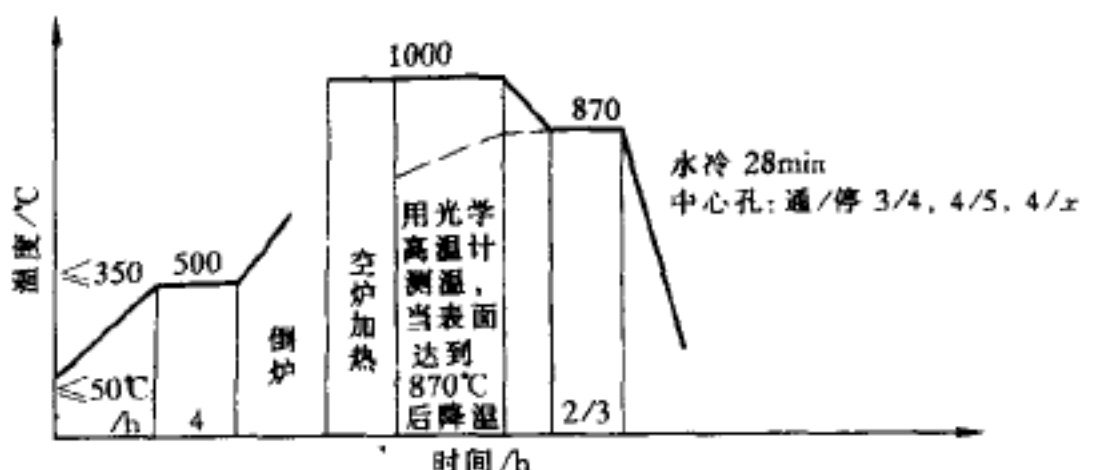


图 19-120 在开台式差温热处理炉内的冷轧工作辊的淬火工艺(虚线表示轧辊表面温度)

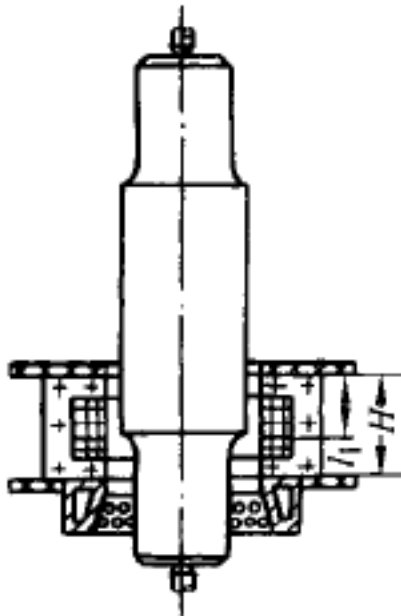
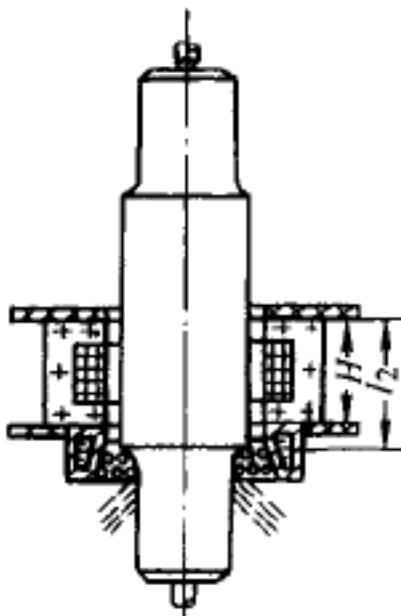
表 19-53 冷轧工作辊感应预热规范

预 热 次 数	感 应 器			两次加热间隔时间 /min	辊身表面温度 /℃
	电 压 /V	电 流 /A	上升速度 /mm·s ⁻¹		
A. 辊身尺寸: φ510×1680, 无中心孔					
1	370	1800	4.0	3	400
2	370	1800	3.2	3	550
3	375	1800	3.0	3	650
4	375	1850	1.8	3	750
B. 辊身尺寸: φ500×1200, 有中心孔					
1	370	1800	2.0	3	500
2	375	1900	1.3	10	800
3	340	1750	1.2	10	820
C. 辊身尺寸: φ400×1200					
1	400	1800	2.5		715
2	400	1800	2.5		785

表 19-54 冷轧工作辊工频连续感应加热淬火基本规范

加热温度/℃	900 ~ 940	淬火用水水压/MPa	0.1 ~ 0.3
感应器比功率/kW·cm ⁻²	0.1 ~ 0.2	淬火用水消耗量/m ³ ·h ⁻¹	~ 5(指每 100mm 辊径)
感应器上升速度/mm·s ⁻¹	0.8 ~ 1.2	淬火续冷时间/min	~ 5(指每 100mm 辊径)
淬火用水水温/℃	≤ 25		

表 19-55 轧辊工频感应淬火主要操作过程

操作 步骤	操 作 过 程	感应器与工件 的相对位置	操作 步骤	操 作 过 程	感应器与工件的相对位置
下 部 预 热	1. 调整感应器, 使与轧辊保持一定相对位置 l_1 $l_1 = \frac{2}{3}H(\text{mm})$ 2. 绕组通水轧辊自转 (10 ~ 20r/min) 3. 通电加热至规定时间后, 感应器上升, 开始连续加热		喷 水 淬 火	感应器上升至规定距离 l_2 后, 喷水冷却轧辊, $l_2 = H + (70 \sim 100)(\text{mm})$	

(续)

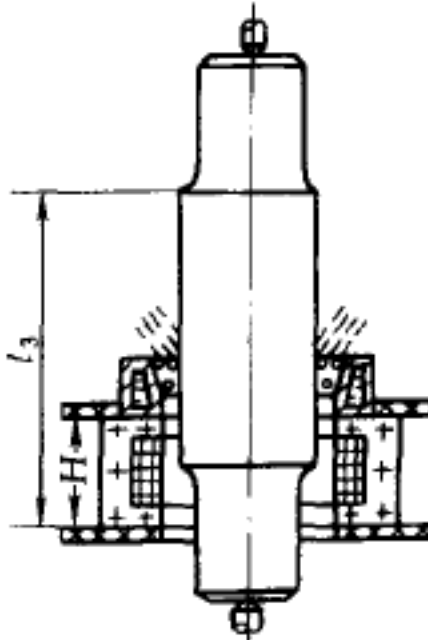
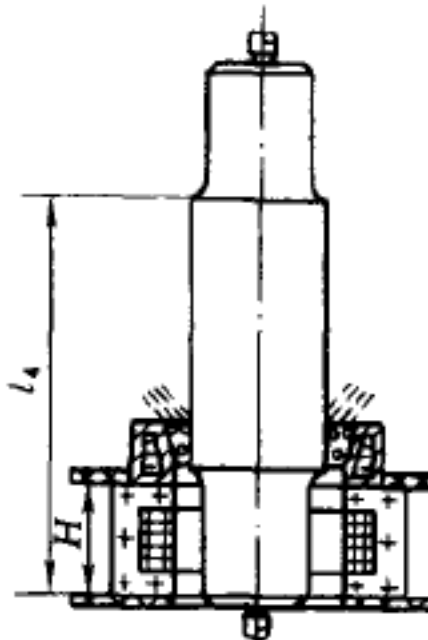
操作步骤	操作过程	感应器与工件的相对位置	操作步骤	操作过程	感应器与工件的相对位置
停止加热	1. 感应器上升至 l_3 , 切断电弧, 继续喷水 2. 感应器以最大速度上升 $l_3 = \text{辊身長} + l_1 + (20 \sim 50) (\text{mm})$		感应器停止上升	1. 感应器上升至 l_4 , 停止上升, 继续喷水至规定时间: $l_4 = l_3 + (50 \sim 100) (\text{mm})$ 2. 停止喷水, 感应器下降, 卸下轧辊	

表 19-56 $\phi 400$ 冷轧辊工频感应淬火记录

项 目	预 热	淬火加热	项 目	预 热	淬火加热
感应器起始位置/mm	270	270	感应器移动速度/ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	上 180、下 300	60
感应器停电位置/mm	1510	1510	轧辊转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	100	100
高压电压/V	9250	8800	喷水淬冷位置/mm		690
感应器端电压/V	360	340	续冷位置/mm		1860
感应器电流/A	2700	3000	续冷时间/min		30

表 19-57 $\phi 660\text{mm}$ 工作辊双工频淬火参数

项 目	第一次预热	第二次预热	加热淬火
网路电压/V	6300	5300	6350
感应器电压/V	415	412	410
感应功率/kW	590	619	600
下部停留时间/s	20	20	25
感应器上升速度/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	1.6	1.5	1
喷水压力/ $\times 0.1\text{MPa}$			0.8
续冷时间/min			90

注: 1. 投入电容 9 组。2. 送电位置 $L_1 = -170$ 。3. 喷水位置 $L_2 = 280$ 。

4. 停电位置 $L_3 = 130$ 。5. 续冷位置 $L_4 = 250$ 。

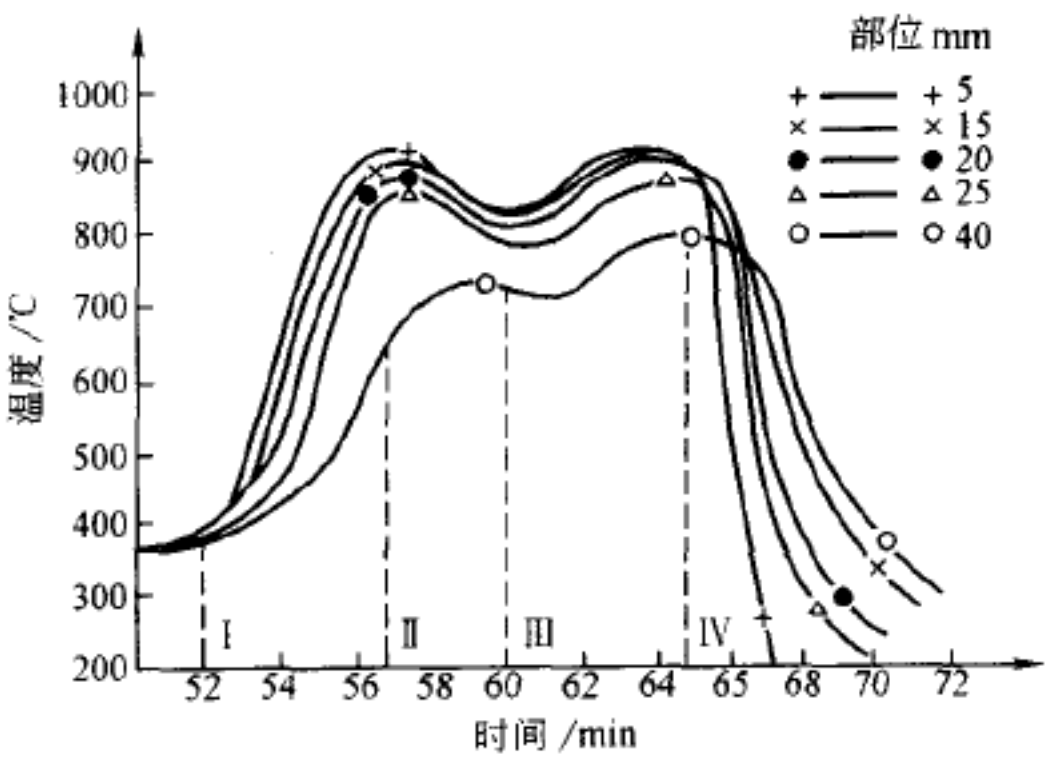


图 19-121 $\phi 660\text{mm}$ 工件工频双感应器
淬火测温曲线

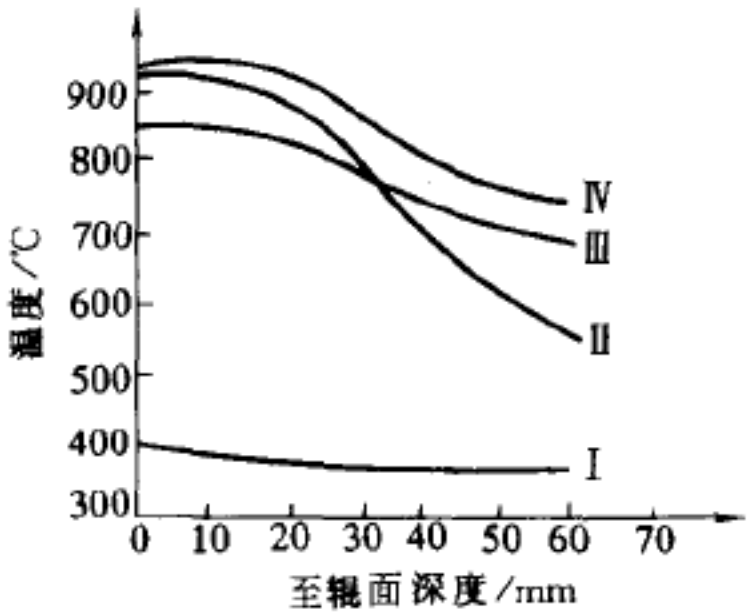


图 19-122 $\phi 660\text{mm}$ 工件工频双感应器
淬火沿径向温度分布
I ~ IV 为沿径向不同加热时间的温度

表 19-58 最终热处理缺陷和防止措施

缺陷名称	产生原因	防止措施
硬度低	1. 淬火温度低 2. 淬冷水压低、水量不够	1. 通过调整电压或机械参数提高淬火温度 2. 增大水压或水量
硬度不均匀	1. 喷水器反水 2. 感应器、喷水器不正	1. 降低水压,改变喷水角度 2. 调整好感应器、喷水器
辊身下端软带过宽	1. 感应器起步位置太高 2. 供水过迟	1. 降低起步位置 2. 提前喷水
辊身上端软带过宽	1. 感应器停电过早 2. 感应器停止位置过低	1. 提高感应器停电位置 2. 提高感应器停止位置
辊身上端边缘脱落(掉边)	1. 感应器停电过晚 2. 感应器停止位置过高	1. 降低感应器停电位置 2. 降低感应器停止位置 3. 加保护环(外径与辊身直径相同)

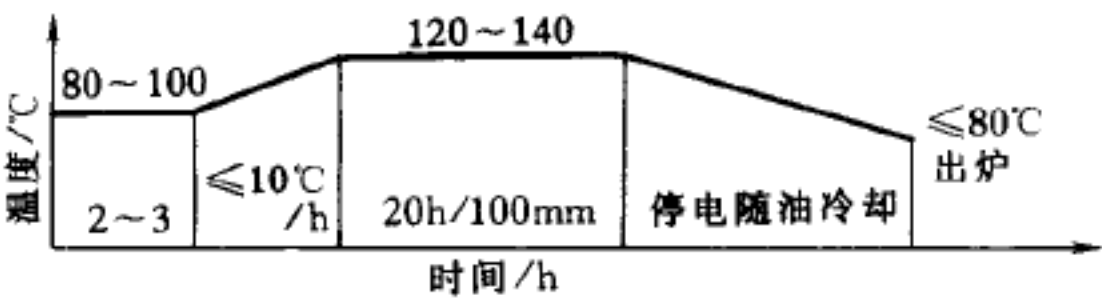


图 19-123 冷轧工作辊回火规范

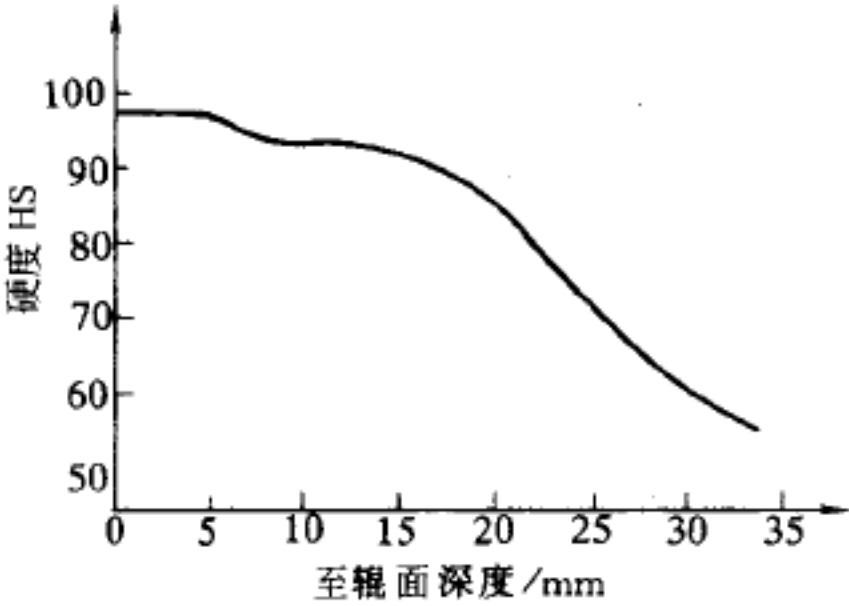


图 19-124 逐层磨削测定 φ660mm 工作辊淬硬层深度

3. 力学性能(表 19-59 和表 19-60,图 19-124 ~ 图 19-128)

表 19-59 冷轧工作辊表面硬度和有效淬硬深度

级 别	辊身表面硬度 HS	辊身有效淬硬深度/mm			辊颈表面硬度 HS
		直径 ≤300	直径 301 ~ 600	直径 601 ~ 900	
I	≥95	6	10	8	35 ~ 50
II	90 ~ 98	8	12	10	
III	80 ~ 90	10	15	12	

表 19-60 辊身两端软带宽度 (单位:mm)

辊 身 长 度	≤600	001 ~ 1000	1001 ~ 2000	≥2000
允许软带宽度≤	40	50	60	70

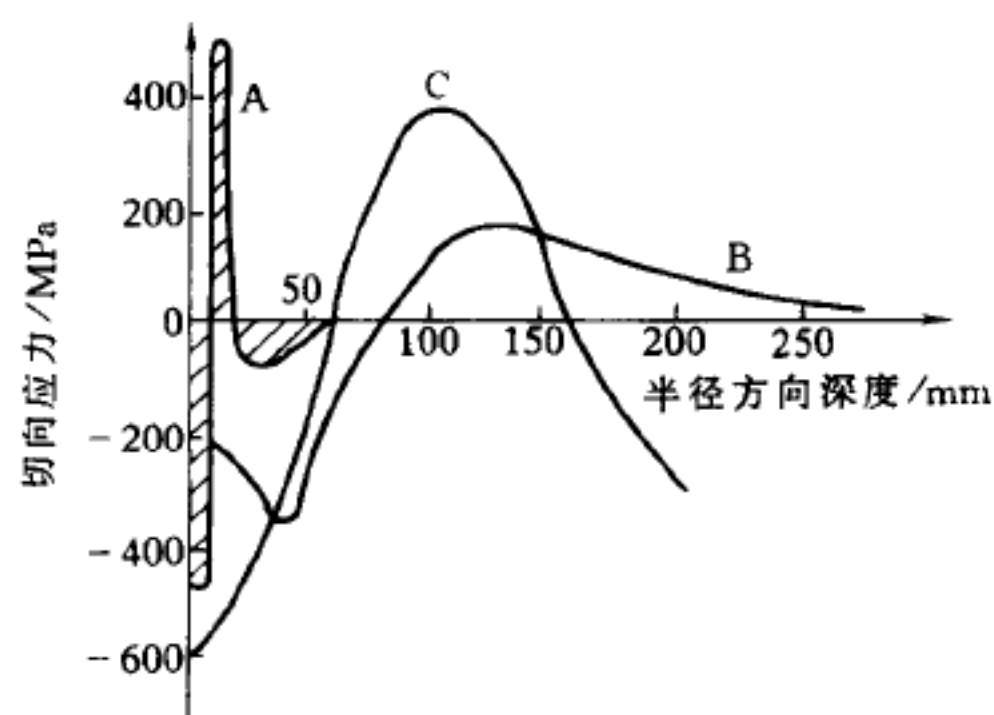


图 19-125 冷轧工作辊切向残余应力分布

A—单频感应加热淬火 B—50Hz-250Hz 双频感应淬火 C—传统整体淬火

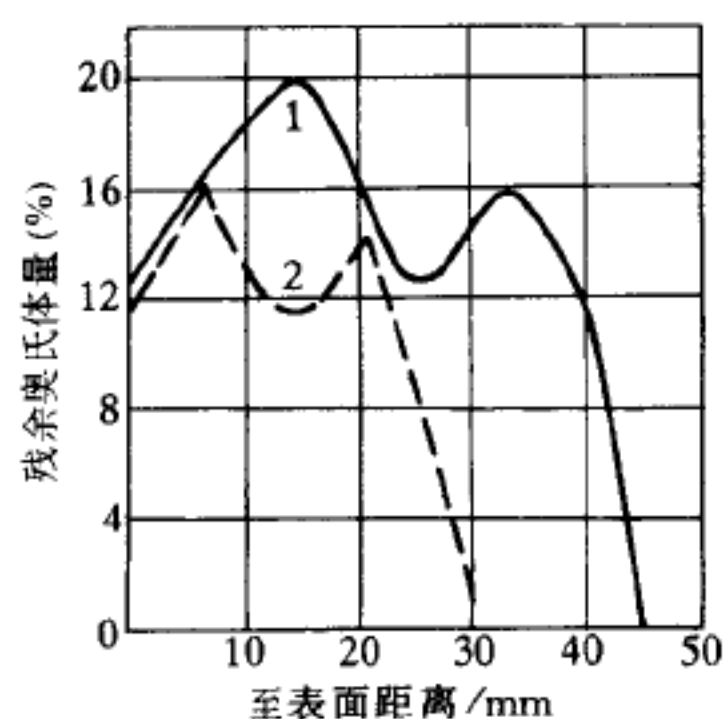


图 19-127 直径 500mm 的 9Cr2MoV 钢冷轧辊淬火层中残留奥氏体的分布

1—在 650℃ 的炉中预热 2—四次感应预热

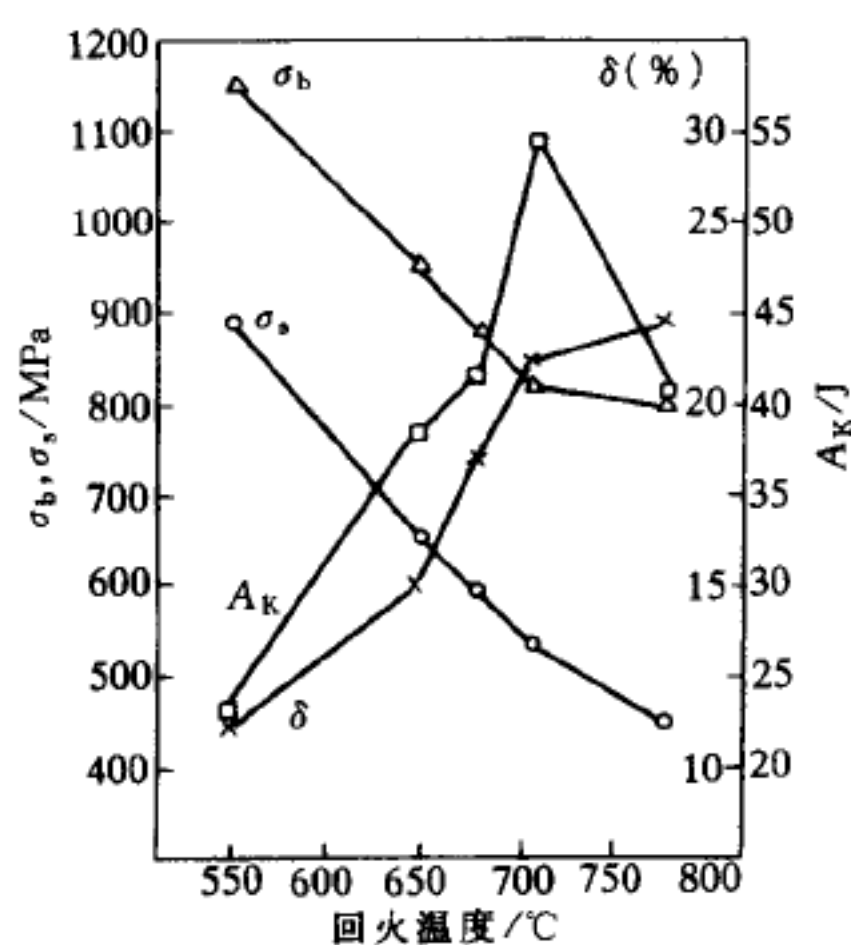


图 19-126 9Cr2Mo 钢力学性能与调质回火温度的关系

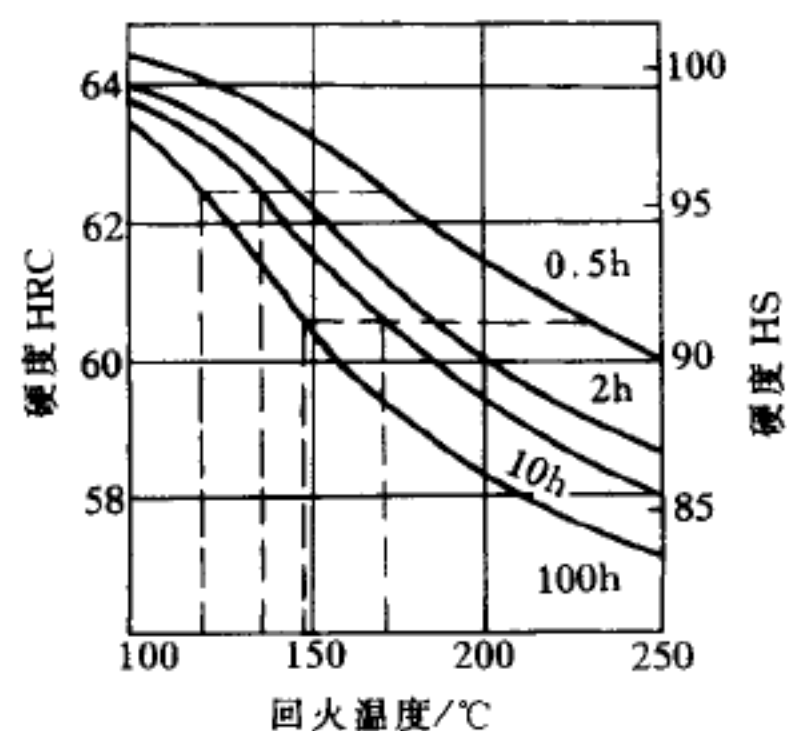


图 19-128 9Cr2 钢的硬度与回火温度和回火时间的关系

第 20 章 农机具及日用五金件热处理

20.1 农机具的热处理

1. 化学成分及性能(表 20-1 ~ 表 20-5)

表 20-1 农机具耐磨零件用钢的化学成分

钢 号	化学成分(质量分数)(%)						RE(加入量)
	C	Si	Mn	S	P	Cr	
Q235	0.09 ~ 0.15	0.12 ~ 0.30	0.25 ~ 0.50	≤ 0.055	≤ 0.045	—	—
20	0.17 ~ 0.24	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	≤ 0.040	≤ 0.040	≤ 0.25	—
45	0.42 ~ 0.50	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	≤ 0.040	≤ 0.040	≤ 0.25	—
65	0.60 ~ 0.70	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	≤ 0.040	≤ 0.040	≤ 0.25	—
65Mn	0.62 ~ 0.70	0.17 ~ 0.37	0.90 ~ 1.20	≤ 0.040	≤ 0.040	≤ 0.25	—
ZG45	≥ 0.42 ~ 0.52	0.20 ~ 0.45	0.50 ~ 0.80	≤ 0.060	≤ 0.060	—	—
41Mn2SiRE	0.37 ~ 0.44	0.60 ~ 1.0	1.40 ~ 1.80	≤ 0.040	≤ 0.040	—	0.15
55SiMnCuRE	0.50 ~ 0.60	0.80 ~ 1.10	0.90 ~ 1.25	≤ 0.040	≤ 0.040	—	0.10 ~ 0.20
65SiMnRE	0.62 ~ 0.72	0.90 ~ 1.20	0.90 ~ 1.20	≤ 0.040	≤ 0.040	—	0.20
40Cr	0.37 ~ 0.45	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	≤ 0.030	≤ 0.030	0.80 ~ 1.10	—
T7	0.65 ~ 0.74	0.15 ~ 0.35	0.20 ~ 0.40	≤ 0.030	≤ 0.035	—	—
T9	0.85 ~ 0.94	0.15 ~ 0.35	0.15 ~ 0.35	≤ 0.030	≤ 0.035	—	—
9Mn2V	0.85 ~ 0.95	≤ 0.35	1.70 ~ 2.00	≤ 0.030	≤ 0.030	—	—
Cr03	1.20 ~ 1.30	≤ 0.35	0.20 ~ 0.40	≤ 0.030	≤ 0.030	0.25 ~ 0.40	—
Cr06	1.30 ~ 1.45	≤ 0.35	0.20 ~ 0.40	≤ 0.030	≤ 0.030	0.50 ~ 0.70	—

表 20-2 普通白口铸铁的成分、组织、性能及应用

化学成分(质量分数)(%)					金相组织	硬度 HRC	热处理	应 用
C	Si	Mn	P	S				
3.5 ~ 3.8	< 0.6	0.15 ~ 0.20	< 0.3	0.2 ~ 0.4	渗碳体 + 珠光体	—	铸态	粮食磨粉机、磨片、导板
4.0 ~ 4.4	≤ 0.6	≥ 0.6	≤ 0.35	≤ 0.15	变态莱氏体, 或变态莱氏体 + 渗碳体	> 48	铸态	标准犁铧
> 4.0	< 0.4	> 1.5	< 0.4	< 0.1		55 ~ 57	铸态	肥西犁铧
4.0 ~ 4.5	0.04 ~ 0.12	0.06 ~ 0.10	0.14 ~ 0.40	0.008 ~ 0.05		50 ~ 55	铸态	阳城犁铧
2.2 ~ 2.5	> 1.0	0.5 ~ 1.0	< 0.1	< 0.1	贝氏体 + 少量托氏体 + 渗碳体	55 ~ 59	900℃/1h + 盐浴 300℃/1.5h + 空冷	高韧犁铧

表 20-3 国外农机具用钢的化学成分和用途举例

国别	钢 号	化学成分(质量分数)(%)					用 途 举 例
		C	Si	Mn	S	P	
美 国	SAE1070	0.64 ~ 0.76	0.10 ~ 0.20	0.60 ~ 0.90	< 0.050	< 0.040	犁铧、犁壁、小前犁、中耕机松土铲、圆盘耙、圆盘犁、牧草与谷物收割机具
	1080	0.74 ~ 0.89	0.10 ~ 0.20	0.60 ~ 0.90	< 0.050	< 0.040	
	1085	0.79 ~ 0.94	0.10 ~ 0.20	0.70 ~ 1.00	< 0.050	< 0.040	
	1090	0.84 ~ 0.99	0.10 ~ 0.20	0.60 ~ 0.90	< 0.050	< 0.040	
	1095	0.89 ~ 1.04	0.10 ~ 0.20	0.30 ~ 0.50	< 0.050	< 0.040	
英 国	En42(BS)	0.70 ~ 0.85	0.10 ~ 0.40	0.55 ~ 0.75	≤ 0.050	≤ 0.050	耕作农具
	En45	0.50 ~ 0.60	1.50 ~ 2.00	0.75 ~ 1.00	≤ 0.050	≤ 0.050	犁铧
德 国	90Mn4(DIN)	0.85 ~ 0.95	0.25 ~ 0.50	0.90 ~ 1.10	< 0.040	< 0.040	犁铧
	C60W3	0.60	0.15 ~ 0.40	0.60 ~ 0.80	≤ 0.035	≤ 0.035	犁铧
	(45MnSi5)	0.44	1.41	0.75			野猪牌犁铧
	C45W3	0.45	0.15 ~ 0.40	0.60 ~ 0.80	≤ 0.035	≤ 0.035	圆盘犁
	C90W3	0.90	0.15 ~ 0.40	0.40 ~ 0.60	≤ 0.035	≤ 0.035	割草机刀片
	C87WS	0.85	0.25 ~ 0.40	0.50 ~ 0.70	≤ 0.025	≤ 0.025	割草机刀片
	C75W3	0.75	0.15 ~ 0.40	0.60 ~ 0.80	≤ 0.035	≤ 0.035	割草机刀片
	45SiMn5(TGL)	0.40 ~ 0.50	1.10 ~ 1.40	1.10 ~ 1.40	< 0.04	< 0.04	犁铧
日 本	SK5(JIS)	0.80 ~ 0.90	< 0.35	< 0.50	< 0.030	< 0.030	犁铧
罗马尼亚	OLC55(STAS)	0.50 ~ 0.60	0.20 ~ 0.40	0.40 ~ 0.80	< 0.050	< 0.040	犁铧
俄罗斯	53-JI(ГОСТ)	0.47 ~ 0.57	0.15 ~ 0.40	0.50 ~ 0.80	≤ 0.050	≤ 0.045	犁铧
	65-JI	0.62 ~ 0.70	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	≤ 0.050	≤ 0.045	犁铧
	65Г	0.62 ~ 0.70	0.17 ~ 0.37	0.70 ~ 1.00	< 0.040	< 0.040	播种机开沟器圆盘
	70Г	0.67 ~ 0.75	0.17 ~ 0.37	0.70 ~ 1.00	< 0.040	< 0.040	播种机形沟器圆盘
波 兰	40GS(PN)	0.34 ~ 0.43	0.75 ~ 1.00	0.7 ~ 1.0	≤ 0.050	≤ 0.045	犁铧

表 20-4 典型的农机具耐磨零件用钢

类别	典型零件	选用钢号	推荐的热处理规范	HRC	附 注
与土壤摩擦的零件	犁 铧	65Mn	830 ± 10℃ 淬火， 280 ± 10℃ 回火	52 ~ 60	65SiMnRE 使用寿命比 65Mn 高约 25% ~ 50%
		65SiMnRE	820 ± 10℃ 淬火， 240 ± 10℃ 回火	52 ~ 60	
	犁 壁	Q235	920 ~ 960℃ 渗碳，770 ~ 780℃ 淬火冷到 180 ~ 200℃ 后自行回 火	50 ~ 60	渗碳层厚 1.5 ~ 2.5mm
		犁壁三层钢板软 中层 Q235，硬外层 65Mn，65 或 60 钢	770 ~ 780℃ 水淬， 180 ~ 200℃ 回火	50 ~ 60	
	旱田耙耙片	65Mn 65SiMnRE	780 ~ 820℃ 油淬， 420 ~ 450℃ 回火水冷	42 ~ 49	
	水田耙耙片	65Mn	800 ~ 830℃ 油淬，450 ~ 500℃ 回 火水冷	38 ~ 44	
	中耕机锄铲	65Mn	780 ~ 830℃ 淬火，300 ~ 350℃ 回火	400 ~ 500HBW	

(续)

类别	典型零件	选用钢号	推荐的热处理规范	HRC	附 注
与土壤摩擦的零件	犁、浅耕机、播种机的圆盘	65Mn	820 ± 10℃ 淬火, 380 ~ 400℃ 回火	42 ~ 49	
	高力中耕机铲	Q235	920 ~ 940℃ 渗碳, 780 ~ 800℃ 淬火, 340 ~ 360℃ 回火	40 ~ 50	渗碳层厚 0.8 ~ 1.5mm
		80 和 Q235 双层 复合钢板	790 ± 10℃ 淬火, 180 ~ 200℃ 回火	50 ~ 60	硬层厚度 1.0 ~ 1.3mm
	推土机铲刀	55SiMnCuRE	淬火、回火		
	拖拉机履带板	41Mn2SiRE	850 ± 10℃ 淬火, 400 ~ 450℃ 回火	38 ~ 45	耐磨性比 45 钢提高 50%
与农作物摩擦的零件	收割机动刀片	T9	860 ± 10℃ 高频淬火, 260℃ 回火	50 ~ 60	
		20	表面处理		
	收割机定刀片	45	淬火、回火		
		20 渗硼或碳氮 共渗	渗硼或碳氮共渗	52 ~ 66	效果以低碳钢加表面 处理为好
		9Mn2V	780 ~ 810℃ 油淬, 150 ~ 200℃ 回火	62	
	铡草机刀片	65Mn	淬火、回火	450 ~ 500HBW	
		65Mn-Q235 贴钢		62 ~ 65	
	甘蔗粉碎机刀片	65Mn	淬火、回火	60 ~ 62	
		9Mn2V			
	饲料粉碎机刀片	65Mn	淬火、回火	60 ~ 62	
		ZG45			
	插秧机秧夹	45	淬火、回火	44 ~ 48	固定秧夹
		65Mn		40 ~ 44	活动秧夹
	脱粒机脱粒钉齿	45	局部淬火、回火	49 ~ 59	
与金属摩擦或受力较大的零件	插秧机滑道	45	淬火、回火	44 ~ 48	局部耐磨部位需表面 处理
	摩擦片	T9	760 ~ 780℃ 水淬, 回火	58 ~ 62	
	插秧机针帘	T7	800 ~ 820℃ 淬火, 回火	56 ~ 60	
	割草机护刃器梁	Q255B	淬火、回火	230 ~ 320HBW	
		45			
	轴及转轴	40, 45 40Cr	全部或局部淬火后回火	280 ~ 360HBW	为提高寿命或修复可采 用表面喷焊自熔合金粉末
牧业机械	剪毛机刀片	Cr06	780 ~ 810℃ 水淬, 180 ~ 200℃ 回火	60 ~ 64	一次剪羊毛约 9 ~ 18 头
		Cr03	820 ~ 840℃ 淬火	60 ~ 62	

表 20-5 农机具耐磨零件用钢的机械性能

钢 号	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ_5 (%)	ψ (%)	α_K /J·cm ⁻²	HBW (热轧)
20	≥380	≥22	≥25	≥55	≥50	≤156
45	≥420	≥25	≥25	≥45		≤241
65	≥610	≥36	≥16	≥30		≤255
65Mn	≥710	≥42	≥10	≥30		≤285
ZG45	≥580	≥32	≥12	≥20	≥30	248~277
41Mn2SiRE	≥800	≥55	≥10	≥20		
65SiMnRE	≥900	≥58	≥8	≥20	≥60	≤320
40Cr	≥1000	≥80	≥9	≥45		

2. 热处理工艺(图 20-1 ~ 图 20-4 和表 20-6 ~ 表 20-12)

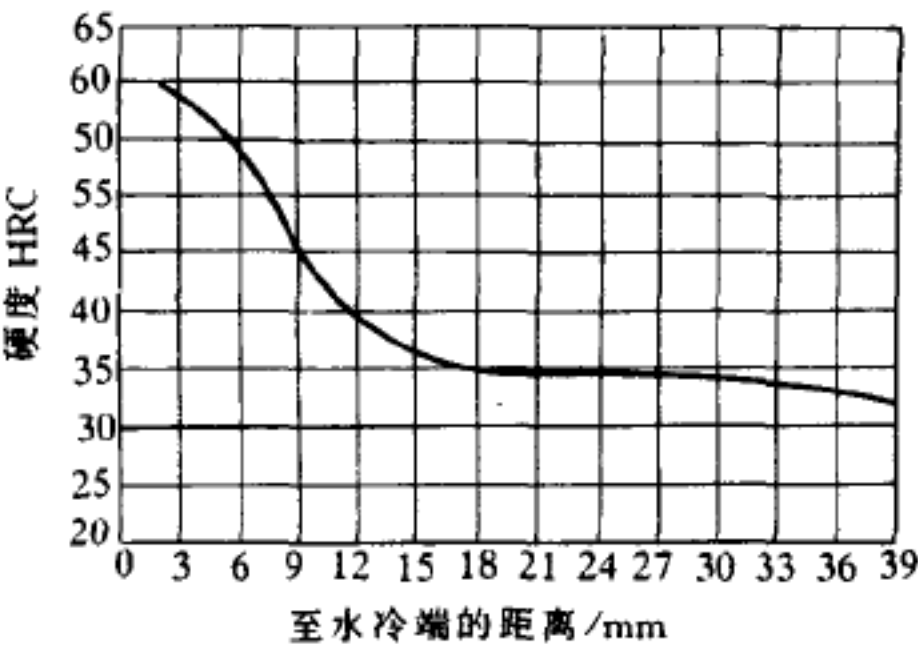


图 20-1 65SiMnRE 钢淬透性曲线

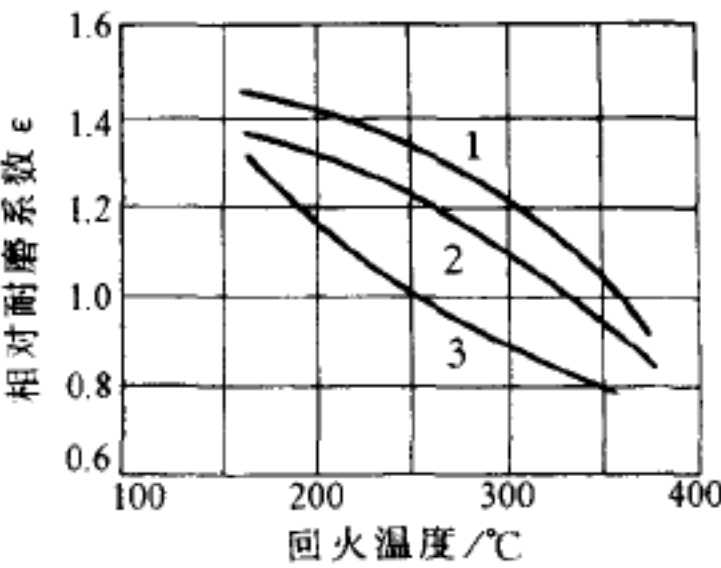


图 20-3 相对耐磨系数和回火温度的关系
1—65SiMnRE 犁铧钢
2—65SiMn 3—65 犁铧钢

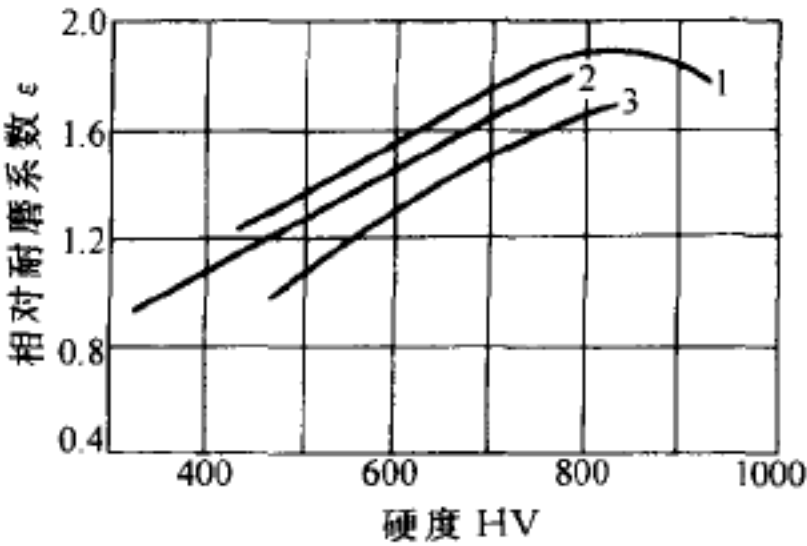


图 20-2 不同钢材淬火回火后
相对耐磨系数和硬度的关系
1—T10 2—65Mn 3—65 钢

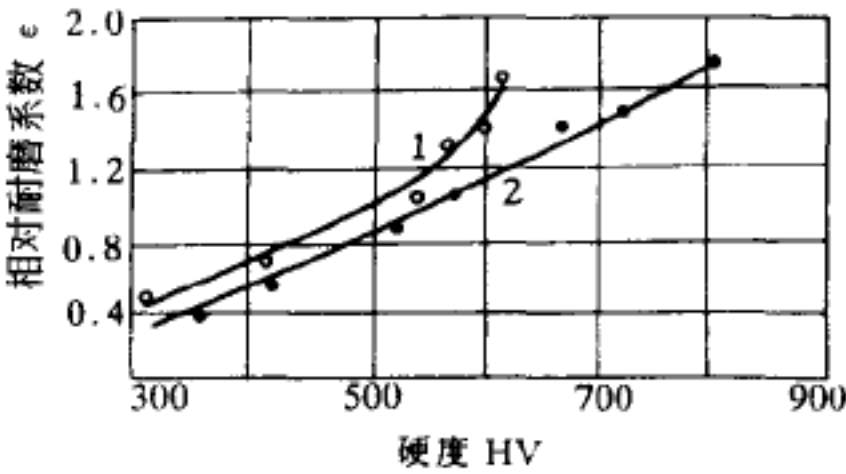


图 20-4 65Mn 犁铧钢不同热处理制度下
硬度与相对耐磨系数关系
1—等温淬火 2—普通淬火回火

表 20-6 淬透性

半马氏体区深度 /mm	淬于下列介质的临界直径/mm				
	NaOH5%	20℃水	40℃水	矿物油	粘度大的矿物油
7.55	34.2	32.0	26.0	20.0	13.7
11.50	48.5	45.0	43.0	36.0	25.0

表 20-7 犁铧热处理工艺规范

零件名称	材 料	淬 火						回 火		硬度 HRC
		加热设备	加热温度 /℃	保温时间 /min	冷 却			温度 /℃	时间 /min	
					介质	温度 /℃	时间 /min			
大型铧	65SiMnRE	盐浴炉	850 ± 5	6 ~ 8	硝盐浴	160 ~ 180	60	180	60 ~ 180	52 ~ 60
大型铧	65Mn	盐浴炉	850 ± 5	6 ~ 8	硝盐浴	160 ~ 180	60	180	60 ~ 90	52 ~ 60
大型铧	稀土镁球铁	盐浴炉	880 ~ 900	6	硝盐浴	280 ~ 310	60	290 ~ 310	240	36 ~ 40
小型铧	高韧性耐磨 白口铸铁	盐浴炉	880 ~ 910	60	硝盐浴	280 ~ 330	60 ~ 90	—	—	55 ~ 60

表 20-8 圆盘材料热处理工艺

零件名称	钢号	加热设备	淬 火			回 火			硬度 HRC
			加热温度 /℃	保温时间 /min	冷却介质	加热温度 /℃	保温时间 /min	冷却介质	
旱田耙耙片	65Mn	RX 型 箱式电炉	840 ~ 860	7	油	400 ~ 450	60	水	42 ~ 49
水田耙耙片	65Mn	RX 型 箱式电炉	840 ~ 860	10	油	450 ~ 500	60	水	38 ~ 44
五铧犁圆盘刀	65Mn	RX 型 箱式电炉	840 ~ 860	3	油	400 ~ 450	60	空气	42 ~ 49
五铧犁圆盘刀	Q275	RX 型 箱式电炉	900 ± 10	3	水	160 ~ 180	60	空气	51 ~ 53

表 20-9 锄铲的热处理工艺规范

零件名称	材料	渗碳加热 温度 /℃	淬 火				回 火			硬度 HRC	备 注
			加热设备	加热温度 /℃	保温时间 /min	冷却介质	加热温度 /℃	保温时间 /min	冷却介质		
锄	Q235-A Q215-B	900 ~ 920	箱式电炉	780 ~ 800	5	水	180 ~ 200	60	空气	40 ~ 50	渗碳层深度 0.8 ~ 1.2mm
	65Mn	—	盐浴炉	840 ~ 860	5	油	320 ~ 340	60	空气	400 ~ 450 HBW	淬火区 20 ~ 30mm
铲	35 钢	—	盐浴炉	860 ~ 880	5	水	180	60	空气	50 ~ 55	空气
	80 + Q215-B 复合钢板	—	盐浴炉	760 ~ 800	5	水	180	60	空气	50 ~ 60	硬层 1.0 ~ 1.3mm

表 20-10 T12J、Cr04、Cr06 钢化学成分

钢号	化学成分(质量分数)(%)					
	C	Si	Mn	S、P	Cr	Mo
T12J	1.15 ~ 1.25	0.2 ~ 0.4	0.2 ~ 0.4	≤ 0.03	—	0.15 ~ 0.30
Cr04	1.15 ~ 1.25	0.15 ~ 0.35	0.3 ~ 0.5	≤ 0.03	0.3 ~ 0.5	—
Cr06	1.37	0.3 ~ 0.5	0.3 ~ 0.5	≤ 0.03	0.6	—

表 20-11 剪毛机刀片热处理工艺

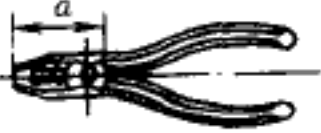
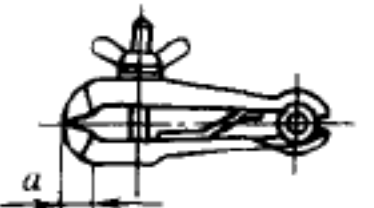
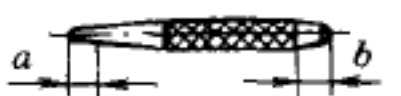
钢号	退 火				碳氮共渗			回 火		硬度 HRC
	退火温度 /℃	退火时间 /h	等温温度 /℃	等温时间 /h	加热温度 /℃	保温时间 /min	冷却介质	加热温度 /℃	保温时间 /min	
T121 Cr04 Cr06	770	2~4	680	2~4	810	30	油	160~180	≥120	≥62

表 20-12 小农具用材料及其热处理工艺

产品名称	钢 号	处理方法	淬 火				回 火			硬度 HRC
			加热 设备	加热温度 /℃	保温时间 /min	冷却 介质	加热温度 /℃	保温时间 /min	冷却 介质	
锄头、 锄板	B2、A3	1200℃ 单面擦渗	红炉 或高频	800~810	4~5	水	局部淬火、自身回火			>50
	45	普通淬火	盐炉	840	4~5	水	300~350	30	空气	40~50
	65+B2 复合钢	普通淬火	盐炉	800~820	4~5	水油	300~350	30	空气	40~50
镐头	45、65Mn	普通淬火	箱式电炉	820~840	10~15	水油	250~300	30	空气	40~50
铁锹	45、50	普通淬火	箱式电炉	820~840	3	水	250~300	30	空气	40~50
	B2、A3	高温快速 冷却淬火	箱式电炉	900~910	3	10% NaOH 水溶液	100	30	空气	
镰刀	刃钢:45、65 本体:Q235	刃口夹(贴) 钢、局部淬火	红炉 或高频	820~840	3	水	局部淬火、自身回火			>50
	45、50、65Mn	普通淬火	箱式电炉	820~840	3	水油	250~300	30	空气	

20.2 日用五金件的热处理(表 20-13)

表 20-13 常用五金、木工工具热处理一览表

工具名称、简图	材料	硬度 HRC		淬火加热方式	淬火加热 温 度 /℃	冷却介质	回火温度 /℃
		工作部分 (a)	其他部分 (b)				
 钢丝钳	T7、T8	52~56		大量生产:气体保 护炉 少量单件:盐浴炉 局部加热	780~800	钳口油 冷3~4秒 后,全部油 冷、水冷或 淬碱浴	200~200
 手虎钳	45、50	42~50		整体加热局部淬火 或局部加热整体淬火	810~840	水	300~380
 中心冲	T7、T8	53~57	32~40	整体加热 a、b 段分 别淬火, a 段回火后, b 段局部高温快速回 火	770~780	水	270~300

(续)

工具名称、简图	材料	硬度 HRC		淬火加热方式	淬火加热温度 /℃	冷却介质	回火温度 /℃
		工作部分 (a)	其他部分 (b)				
 钳工凿子	T7、T8	53 ~ 57	32 ~ 40	整体加热 a、b 段分别淬火, a 段回火后, b 段局部高温快速回火	770 ~ 780	水	270 ~ 300
 钳工锤	50	49 ~ 56		专业生产厂: 连续式加热炉, 局部淬火 少量单件: 盐浴炉局部加热淬火	810 ~ 840	水	250 ~ 300
	T7、T8				770 ~ 780		270 ~ 350
 螺钉旋具	50、60	48 ~ 52		局部加热淬火或整体加热局部淬火	820 ~ 850	水	250 ~ 320
	T7、T8				770 ~ 780		300 ~ 350
 大锤	T7	49 ~ 56		局部加热淬火或整体加热局部淬火	790 ~ 810	水	270 ~ 350
 铁皮剪	T7	52 ~ 60		局部加热淬火或整体加热局部淬火	780 ~ 800	水	200 ~ 320
 双头扳手	50	全部 41 ~ 47		盐浴炉或连续式加热炉	820 ~ 840	水	380 ~ 420
	40Cr				840 ~ 860	油 硝盐	400 ~ 440
 活动扳手	50	全部 41 ~ 47		盐浴炉或连续式加热炉	810 ~ 830	水油分级	380 ~ 420
	40Cr				840 ~ 860	油 硝盐	400 ~ 440
 鲤鱼钳	50	48 ~ 54		局部加热淬火或整体加热局部淬火	820 ~ 840	水	290 ~ 310
 木工刨刀片	轧焊刀片 GCr15 刀体: 20	61 ~ 63		整体加热全淬或局部淬火	840 ~ 860	油	150 ~ 170
	T8、T9	57 ~ 62			770 ~ 790	水	220 ~ 230

(续)

工具名称、简图	材料	硬度 HRC		淬火加热方式	淬火加热温度 /℃	冷却介质	回火温度 /℃
		工作部分 (a)	其他部分 (b)				
 木工凿子	T8、T9	57 ~ 62		局部加热淬火或整体加热局部淬火	770 ~ 780	水	200 ~ 230
 木工斧头	T7、T8	50 ~ 56		局部加热淬火或整体加热局部淬火	770 ~ 790	水	270 ~ 350
 木工手锯	T10	42 ~ 47		盐浴炉或保护气体炉	770 ~ 790	油	450 ~ 470
 木工钻头	T7、T8	44 ~ 48		局部加热淬火或整体加热局部淬火	770 ~ 780	水	360 ~ 420
 木工钳子	T7	43 ~ 50		局部加热淬火或整体加热局部淬火	770 ~ 780	水	300 ~ 400

第 21 章 热处理的质量控制

21.1 热处理技术标准和热处理工艺守则(表 21-1)

表 21-1 热处理技术标准

序号	标准编号	标 准 名 称
1	JB/T10174—2000	钢铁零件强化喷丸的质量检验方法
2	JB/T10175—2000	热处理质量控制要求
3	JB/T3999—1999	钢件的渗碳与碳氮共渗淬火、回火
4	JB/T4155—1999	气体氮碳共渗
5	JB/T4202—1999	钢的锻造余热淬火回火处理
6	JB/T4390—1999	高、中温热处理盐浴校正剂
7	JB/T7951—1999	淬火介质冷却性能试验方法
8	JB/T8929—1999	深层渗碳
9	JB/T9197—1999	不锈钢和耐热钢热处理
10	JB/T9198—1999	盐浴硫氮碳共渗
11	JB/T9199—1999	防渗涂料技术要求
12	JB/T9200—1999	钢铁件的火焰淬火回火处理
13	JB/T9201—1999	钢铁件的感应淬火回火处理
14	JB/T9202—1999	热处理用盐
15	JB/T9203—1999	固体渗碳剂
16	JB/T9204—1999	钢件感应淬火金相检验
17	JB/T9205—1999	珠光体球墨铸铁零件感应加热淬火金相检验
18	JB/T9206—1999	钢件热浸铝工艺及质量检验
19	JB/T9207—1999	钢件在吸热式气氛中的热处理
20	JB/T9208—1999	可控气氛分类及代号
21	JB/T9209—1999	化学热处理渗剂技术条件
22	JB/T9210—1999	真空热处理
23	JB/T9211—1999	中碳钢与中碳合金结构钢马氏体等级
24	JB/T8555—1997	热处理技术要求在零件图样上的表示方法
25	JB/T4215—1996	渗硼(代替 JB/T4215—1986 和 JB/T4383—1987)
26	JB/T8418—1996	粉末渗金属
27	JB/T8419—1996	热处理工艺材料分类及代号
28	JB/T8420—1996	热作模具钢显微组织评级
29	JB/T7709—1995	渗硼层显微组织、硬度及层深测定方法
30	JB/T7710—1995	薄层碳氮共渗或薄层渗碳钢铁显微组织检验
31	JB/T7711—1995	灰铸铁件热处理
32	JB/T7712—1995	高温合金热处理
33	JB/T7713—1995	高碳高合金钢制冷作模具用钢显微组织检验
34	JB/T4218—1994	硼砂熔盐渗金属(代替 JB/Z235—1985 和 JB/T4218—1986)
35	JB/T7500—1994	低温化学热处理工艺方法选择通则

表 21-3 材料合格卡片

合格卡编号

年 月 月

查索号:

综合实验报告编号		钢厂编号	
钢 号		材料规格	
材料状态		炉 号	

材料保管号

表 21-4 钢铁材料领料单

查索号:

综合实验报告编号		钢厂编号		炉 号	
钢 号		材料规格		材料状态	
总领料数		加工零件号		加工零件名称	
领料日期		领 料 员		备 料 员	

表 21-5 淬冷油质量检验报告

查索号:

名称:	代号:	生产厂:	购进日期:	来源:					
运动粘度/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	闪点/ $^{\circ}\text{C}$	凝固点/ $^{\circ}\text{C}$	残炭(%)	灰分(%)	水分(%)	杂质(%)	添加剂(%)	硫(%)	磷(%)

化验日期:

化验员:

表 21-6 原材料综合试验报告

编号:	年 月 日	查索号:					
钢厂编号	钢号	来源	规格	炉号	炉次	重量	钢厂质保书编号

化学成分(质量分数)(%)

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	W	V	Ti	Nb	Cu	Mg	其他

化验员

力 学 性 能

试 样	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ (%)	ψ (%)	a_K /J·cm ⁻²	硬 度	
						HBW	HRC

实验员:

宏 观 及 微 观 组 织

低 倍 组 织			金 相 组 织						淬透性实验
一般疏松	中心疏松	偏 析	晶粒度	退火组织	带 状	网 状	液 析	其 他	

实验员

主任

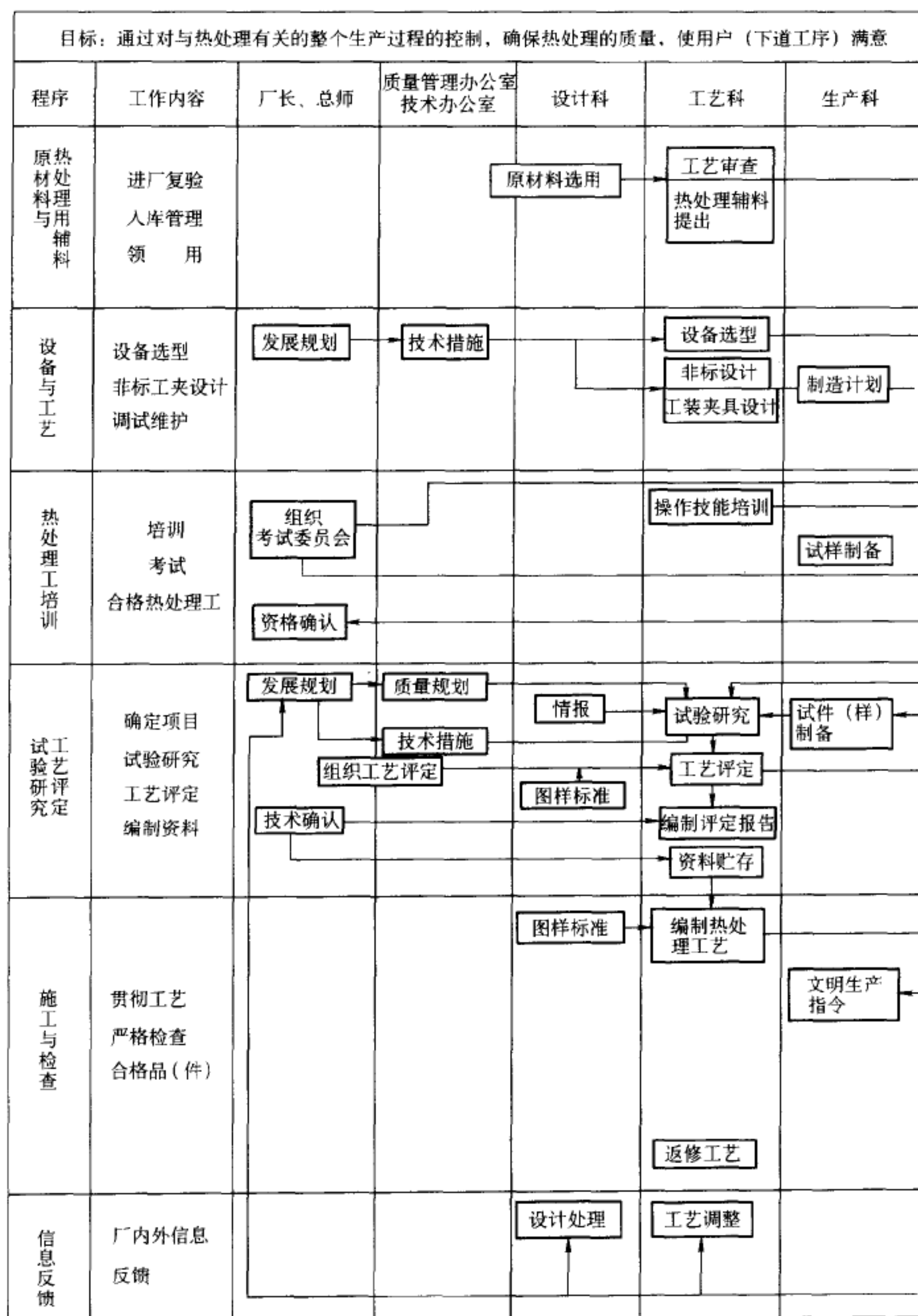
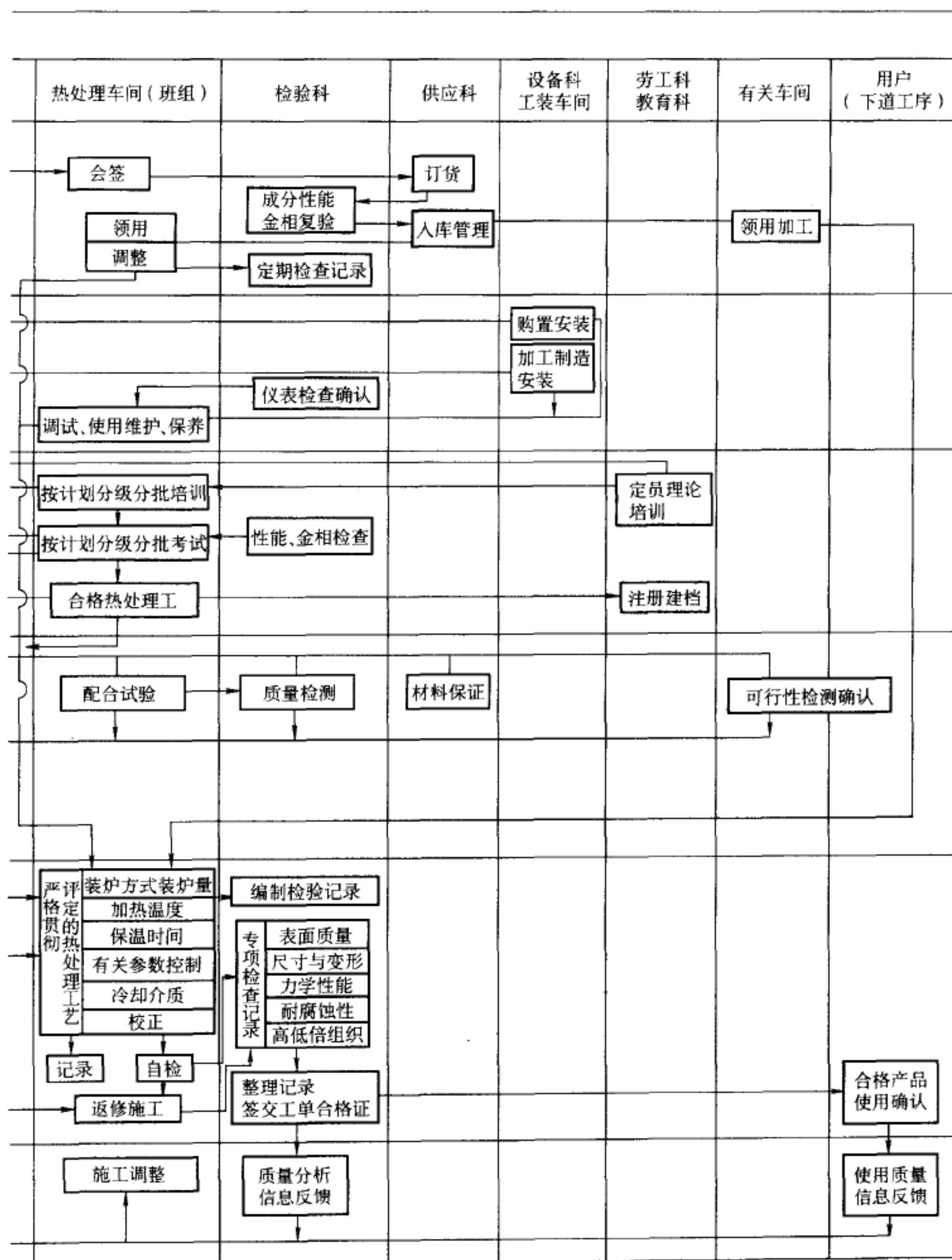


图 21-1 热处理



质量保证体系图

表 21-10 加热炉分类及技术要求

类别	保温精度允许最大偏差/℃	控温指示精度/℃	仪表精度等级,不低于
I	± 3	± 1.0	0.25
II	± 5	± 1.5	0.3
III	± 10	± 5.0	0.5
IV	± 15	± 8.0	0.5
V	± 20	± 10.0	0.5
VI	± 25	± 10.0	0.5

表 21-11 热处理炉有效加热区检定周期

类别	检定周期	类别	检定周期
I	一个月	IV	半年
II	半年	V	一年
III	半年	VI	一年

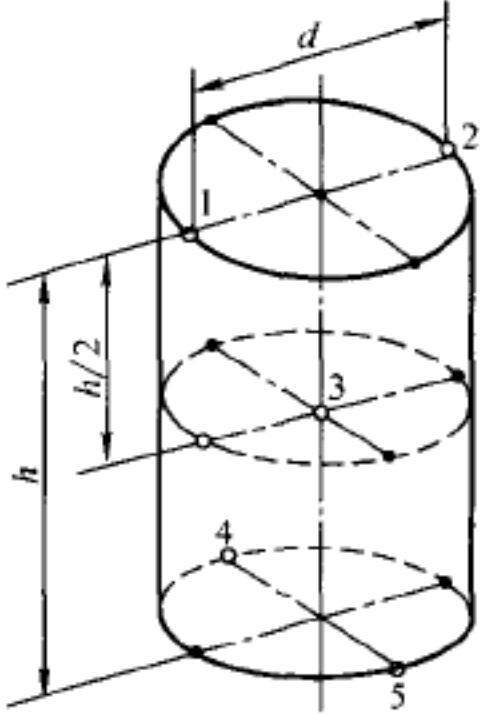
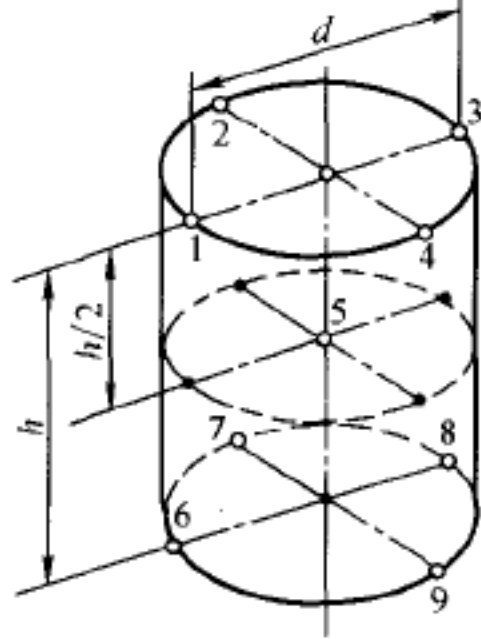
表 21-12 系统检定允许温度偏差

热处理炉类别	允许温度偏差/℃
I、II	± 1
III、IV、V、VI	± 3

表 21-13 仪表检定周期

加热炉类别	仪表检定周期	加热炉类别	仪表检定周期
I	三个月	IV	半年
II	半年	V	一年
III	半年	VI	一年

表 21-14 周期井式热处理炉检测点数量和位置

直径 d 深度 h	$\leq 1\text{m}$	$> 1 \sim 2\text{m}$
		

(续)

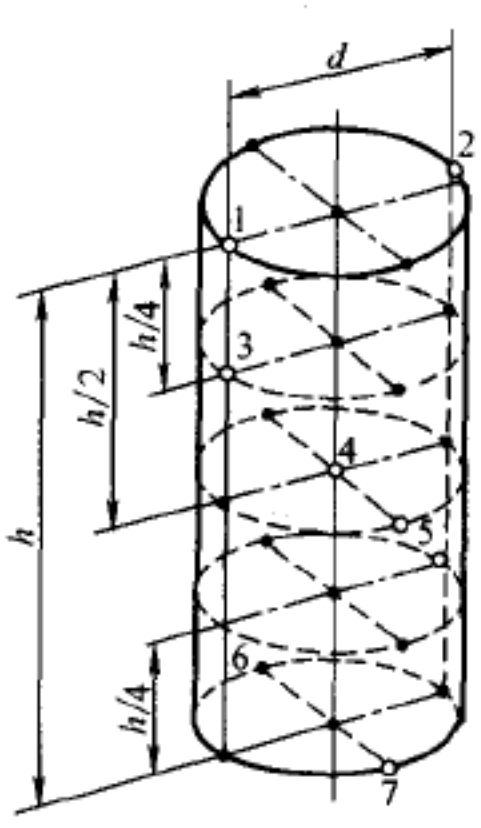
深度 h	直径 d	$\leq 1\text{m}$	$\leq 1 \sim 2\text{m}$
			
$> 1 \sim 2\text{m}$			

表 21-15 周期箱式热处理炉检测点数量和位置

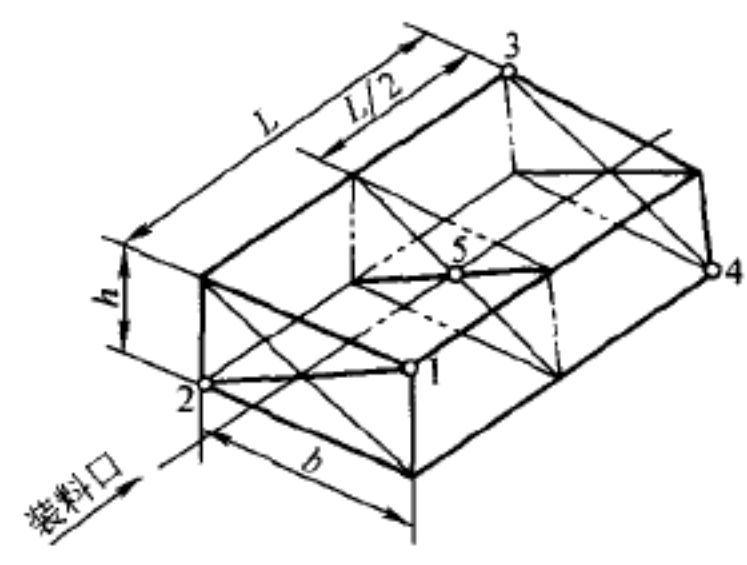
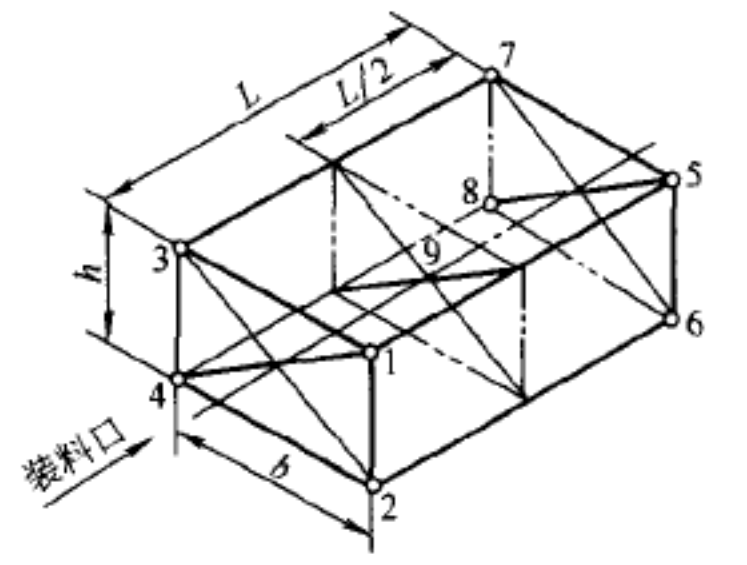
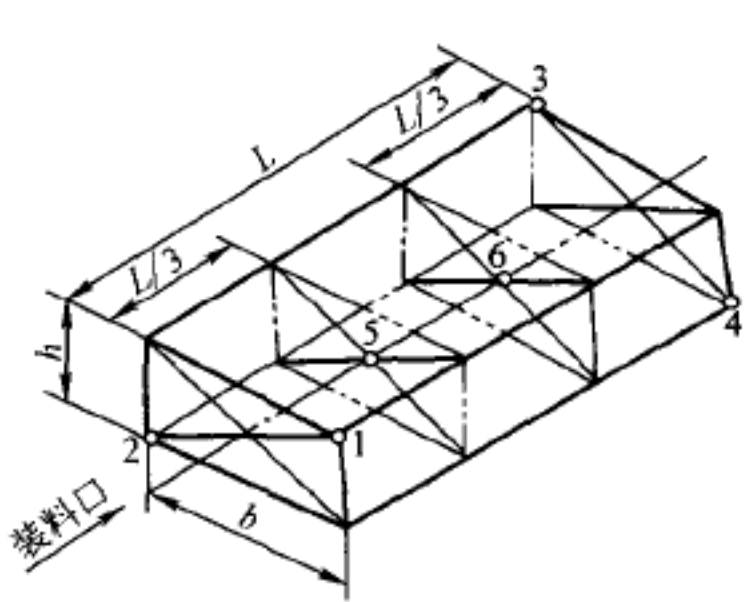
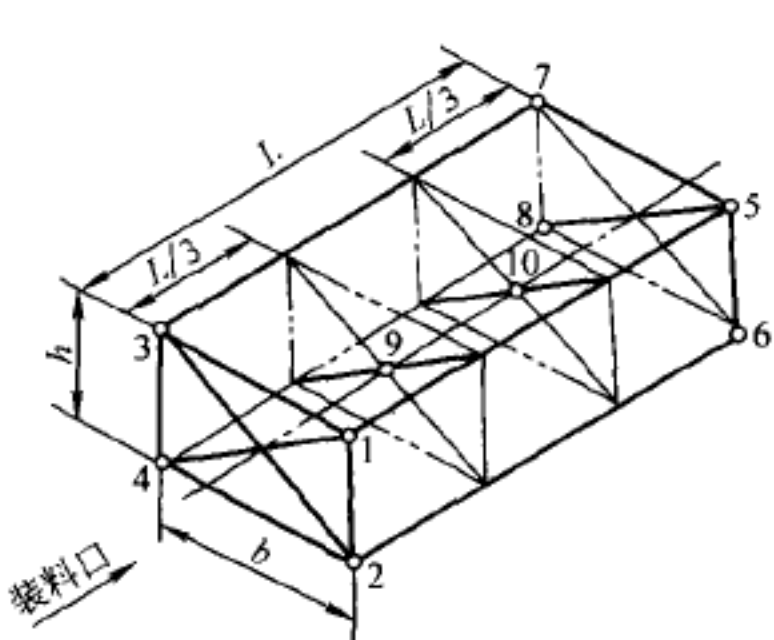
高 h	长 L	宽 b	$\leq 0.7\text{m}$	$> 0.7\text{m}$
$\leq 1.5\text{m}$	$\leq 2\text{m}$			
$\leq 1.5\text{m}$	$> 2 \sim 3.5\text{m}$			

表 21-16 有效加热区检测合格卡

热处理炉名称				型 号	
使用温度/℃		精度/ \pm ℃		保温精度类别	

装炉量及装炉注意事项:

有效加热区图示:

检测日期		下次检测日期	
责任者		日期	批准者 日期

表 21-17 现场使用的热电偶技术要求

名 称	分度号	等 级	使用温度/℃	允许偏差/℃	检定周期
标准铂铑 10—铂热电偶	S	Ⅱ 等标准	0 ~ 1600	± 0.9	一年
检测镍铬—镍硅热电偶	K	Ⅰ 等标准	0 ~ 400	± 1.6	三个月
			400 ~ 1100	$\pm 0.47\% t$	
铂铑 10—铂	S	Ⅰ	0 ~ 1100	± 1	一年
			1100 ~ 1600	$\pm [1 + (t - 1100) \times 0.003]$	
		Ⅱ	0 ~ 600	± 1.5	
			600 ~ 1600	$\pm 0.25\% t$	

(续)

名 称	分度号	等 级	使用温度/℃	允许偏差/℃	检定周期
铂铑 30—铂铑 6	B	I	600 ~ 1700	$\pm 0.25\% t$	半年
		II	800 ~ 1700	$\pm 0.5\% t$	
镍铬—镍硅	K	II	0 ~ 400	± 3.0	半年
		II	400 ~ 1100	$\pm 0.75\% t$	
铜—康铜	T	II	-40 ~ +350	± 1.0	半年
		II	-200 ~ +40	± 1.0 或 $\pm 1.5\% t$	
镍铬—康铜	E	II	-40 ~ +800	± 1.5 或 $\pm 0.4\% t$	半年
		II	-40 ~ +900	$\pm 2.5\%$ 或 $\pm 0.75\% t$	

注:1. 表中 t 为测量温度(℃)。

2. 允许按实际需要缩短检定周期。

表 21-18 待热处理件的原始资料

项 目	说 明
1. 待热处理件的试验数据 钢号 化学成分 ^① 炼钢炉号 ^① 拉伸试验数据 ^① 硬度试验数据 ^① 淬透性试验数据 ^① 金相组织试验数据 ^①	晶粒度、脱碳层深度,非金属夹杂物、微观及宏观组织
2. 待热处理件的供货状态 铸造 锻造 热轧 热挤压 冷拔	注明铸造工艺 注明冷锻或热锻,必要时注明锻造比
3. 待热处理件热处理前的加工方式 切削方法及切削量 ^① 冲压或拉制 冷轧或冷挤压 焊接 热校正或冷校正 ^①	进刀量大的重切削有可能引起裂纹或成为淬裂的原因 注明冷热加工状态 注明焊接部位 注明相对于基准尺寸偏差的校正量
4. 待热处理件的预先热处理类型 正火(或正火回火) 完全退火 球化退火 去应力退火 调质	必要时注明加热温度,保温时间,冷却方法

① 对一般工件,此项目可以省略。

表 21-19 热处理作业指导书

编号:

热处理作业指导书		产品名称		产品型号		厂名:		年 月 日编订					
		零件名称		零件号		简图							
材 料			工 艺 路 线										
每台件数													
单件重量/kg			技术条件										
热处理前 零件状况													
工 艺 规 范	序号	工序 名称	设备 编号 及名称	工具 编号 及名称	装炉 (盘) 数量	加热 温度 /℃	推料 周期 /min	加热 时间 /min	冷 却			管理 点	注 1. 检查频次 全:百分之百检查 1/N:N 件检查 1 件 N/C:每炉检查 N 件 K × N/D:每班 K 次每次 N 件 2. 重要度 a. 关键 b. 重要 c. 一般 3. 管理手段 a. 管理图 b. 计量用表 c. 计数用表 d. 不用记录 4. 首检 A:开始工作时 B:调整设备时 C:换工序时
									介质	温度 /℃	方法		
特 别 注意事项													
工 序 质 量 管 理 点 表	代号	检查 项目	检查 部位	工艺 要求	管理 介限	测量 方法	测量频次			重要度	管理 手段		
							自检	首检	巡检				
											编制		
											校对		
											会签		
											审批		

表 21-20 热处理工艺卡

编号:

		(厂 名)		热处理工艺卡			标记		工件名称				工件编号																									
									产品型号				共 页		第 页																							
工件草图					材料及牌号					化学成分 (质量系数)		处理要求		处理前之要求																								
					外型尺寸					%																												
					工件重量					%																												
					每车件数					%																												
					工件送来部门					%																												
					工件送往部门					%																												
					处理前状态					%																												
工 序 号		工 序		设备 型号 名称		工具 编号 名称		加 热			冷 却			同时 装炉 数量		工序之要求		工人 等级		工 时 定 额																		
								温度 /℃			加热 时间			保温 时间			冷却 剂			温度 /℃			时间 方式							基本 工时 /min			辅助 工时 /min			每件 工时 /min		
描 图																																						
底图号																																						
档案号																																						
日期		签字																																				
				标记		处数		更改 文件号		签字		日期																										

表 21-21 热处理工艺规程卡

[illegible]

表 21-25 球墨铸铁曲轴加工质量随同卡

零件编号			零件图号			炉 号			查索号		
铸件化学成分分析报告(%)	W_C	W_{Si}	W_{Mn}	W_P	W_S	W_{Mg}	W_{RE}	W_{Mo}	W_{Ni}	W_{Cu}	
	浇注班组					化验员				化验日期	
金相分析报告	球化级别	共晶团数 /(个/ mm^2)	石墨球径 /mm	珠光体量 (体积分数) (%)	游离渗碳 体量 (体积分数) (%)	游离磷 共晶量 (体积分数) (%)	夹杂		疏松和 气孔		
	金相检验员					检验日期					
粗加工 质量报告	圆角及主要部位尺寸		表面粗糙度		表面有无氧化色		有无毛刺或机械损伤		有无铸造缺陷		
	操作者				检验员				日期		
热处理 质量	淬火硬度 HRC		淬火畸变量		回火硬度 HRC		金相检验结果				
	淬火操作		回火操作		检验员		日期				
磨削 质量	圆角及主要部位尺寸		表面粗糙度		表面有无氧化色		磨削所用工时		表面探伤结果		
	磨削工人				生产日期				探伤及检验员		

表 21-26 不合格品单

零件名称	零件编号:	生产日期:	查索号:
不合格品说明:			
产生原因:			
纠正措施或其他处理意见:			
操作者:	检验员:	技术人员:	车间主任:

表 21-27 热处理不合格通知单

型号/名称	图 号	交检数	不合格数	交检人	交检日期	检验日期

不合格原因：

通知单发出日期		接收人		检验员	
---------	--	-----	--	-----	--

备注：

表 21-28 废品单

废品单编号	废 品 单	查 索 号
零件号：	零件名称	工序号及名称
废品数量：	操作者：	日期：

废品说明：

检验员：

车间技术人员：

车间主任

表 21-29 热处理废品单

产品名称:

No

零件名称	图 号	报废数量	工时定额	材料定额
生产单号:				
制造者:				
技术组长:				
检验组长:				
填 表 人		报废日期		

表 21-30 热处理零件回用申请单

编号:

产品 型号		名称		生产单号 (或合同号)	
		图号 (或规格)		数 量	
回用原因及零部件加工情况	回用申请部门: 回用申请人: 年 月 日				
处 理 意 见					
审 批 手 续	同意:	审定:	会签:	批准:	
	年 月 日	年 月 日	年 月 日	年 月 日	

* 审批手续按规定进行。

表 21-31 热处理质量损失单

零件名称			数 量		
图 号			是否外协件		
损失类别	废 品			回 用	
损 失 说 明					
计划价单价	元		合 计	元	
损失费用	按		% 计	元	
填写人		成本员		检验站	

年 月 日

表 21-32 热处理产品质量监督抽查反馈单

受检产品			受检单位		
检查依据					
检查项目					
检查结果					
检查结论					
备 注					
检查人员			检查时间		

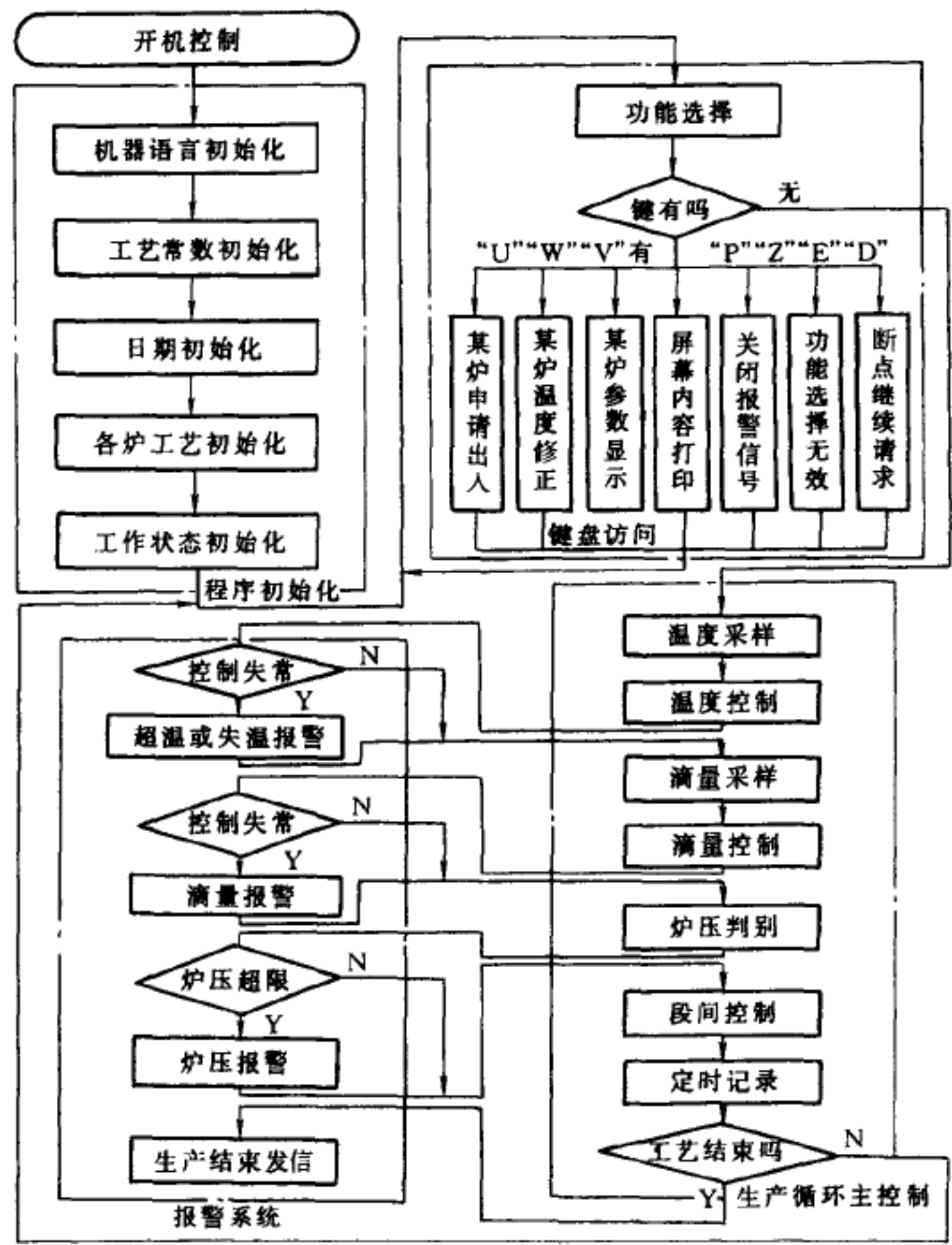


图 21-2 气体渗碳软件程序方框图

21.3 热处理质量统计分析图表(图 21-3 ~ 图 21-7,表 21-33,表 21-34)

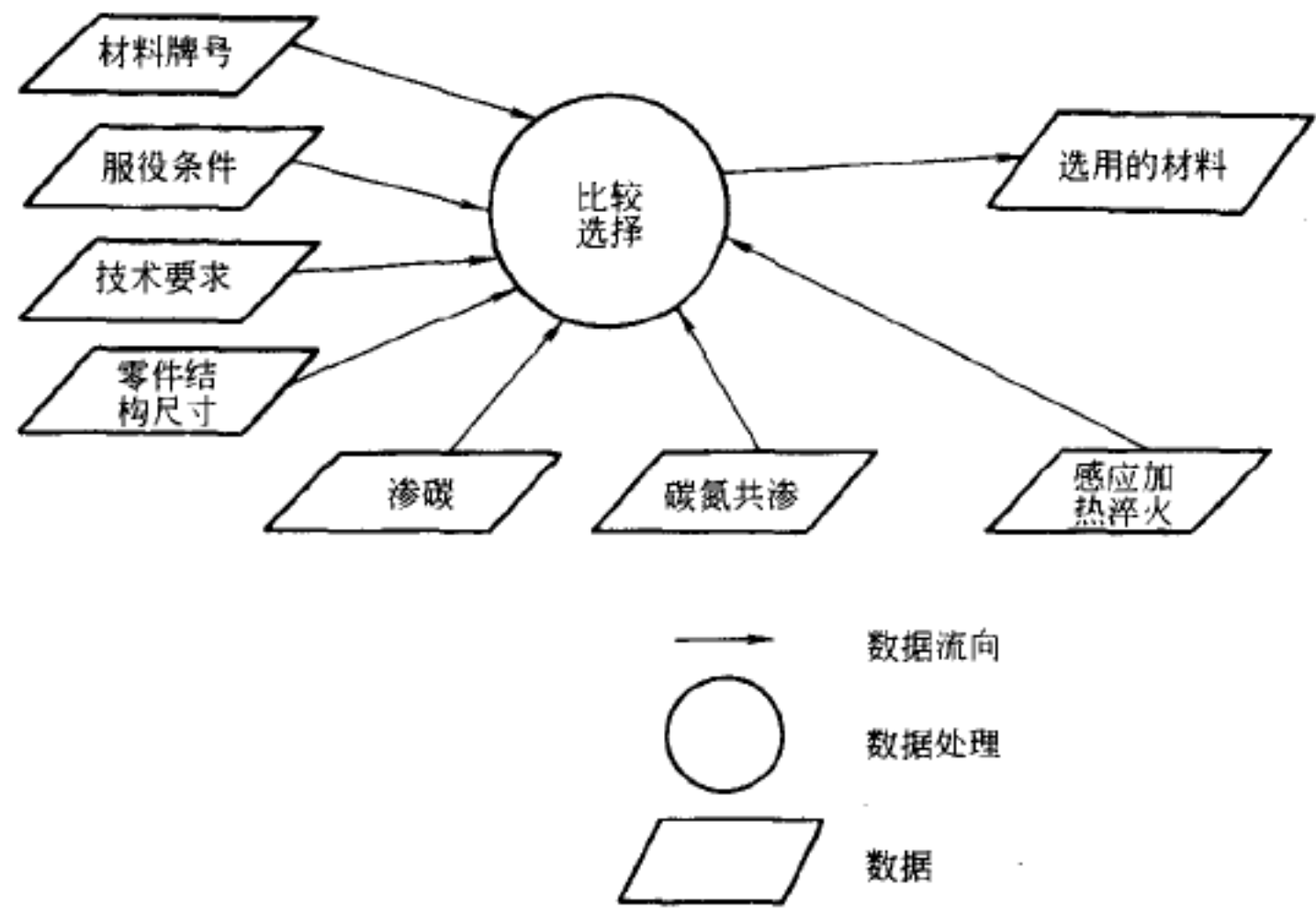


图 21-3 给定材料和技术要求,选择表面强化工艺的数据流程图

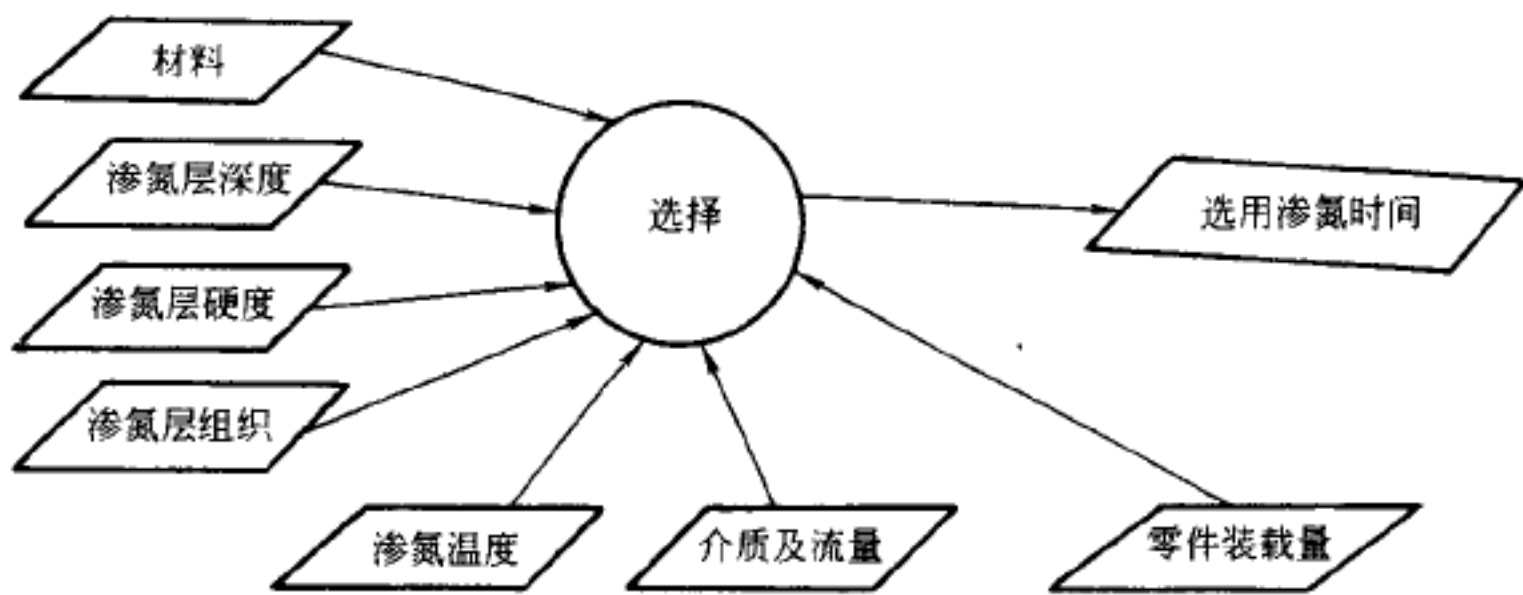


图 21-4 给定渗氮材料和技术要求,选择渗氮时间的数据流程图

表 21-33 闭锁销不良品统计表

项 目		件数	比率(%)	累计百分数(%)
未淬硬		464	72.5	72.5
超局部淬硬		81	12.7	85.2
硬度不匀		50	7.8	93.0
大块软点		23	3.6	96.6
过热		14	2.2	98.8
其他	过烧	5	1.2	100
	脱碳	3		
合 计		640	100	

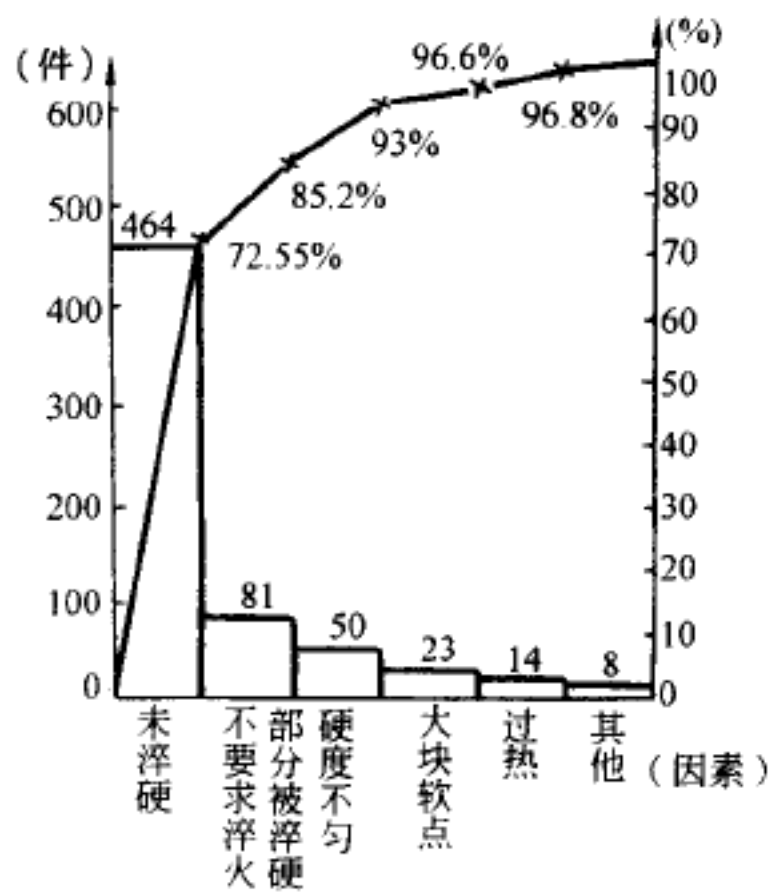


图 21-5 闭锁销不良品排列图

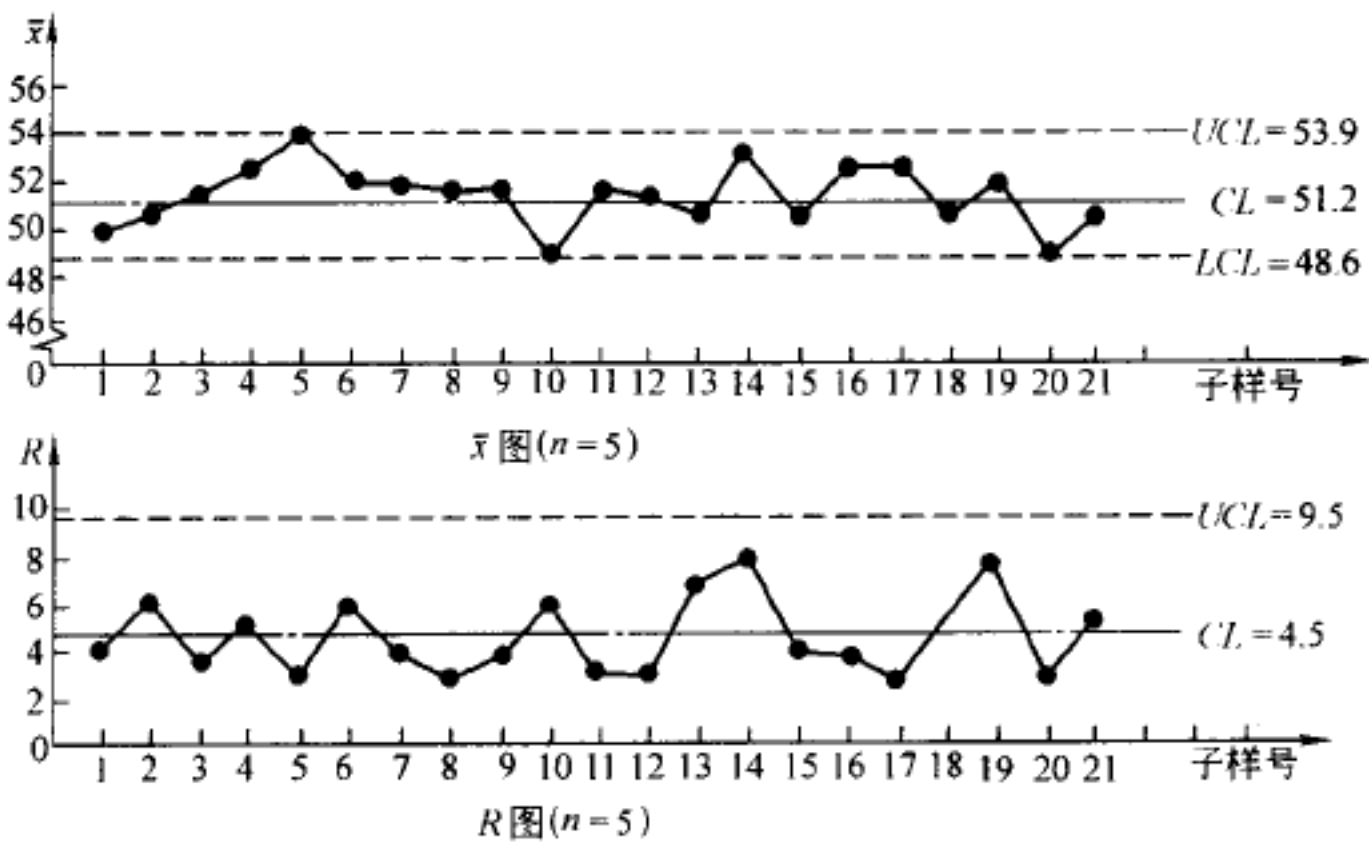


图 21-6 传动链轮淬火硬度 \bar{X} -R 控制图

表 21-34 传动链轮淬火硬度统计表

× × 厂		淬火硬度调查记录表					工艺验证表(1)			
热处理车间							82 年 5 月 18 日			
零件图号	LM224-160-2109	工序名称		加热淬火			量 具		洛氏硬度计	
零件名称	传动链轮	使用设备		淬火升降台			测量人		× × ×	
工序要求	51 ± 4HRC	操作人		× × ×			记录人		× × ×	
工艺规范	用乙炔氧焰双喷嘴推进加热,使工件单齿二侧面温度达到 840 ~ 880℃后,下水转动冷却									
时间	组号	测 量 值					总计 Σ <i>x</i> ₄	平均 (<i>x̄</i>)	极差 (<i>R</i>)	备 注
		<i>x</i> ₁	<i>x</i> ₂	<i>x</i> ₃	<i>x</i> ₄	<i>x</i> ₅				
8:00	1	49	48	53	50	48	248	49.5	5	
:30	2	49	54	51	48	52	254	50.8	6	
9:00	3	47	46	49	45	46	233	46.6	4	
30	4	52	52	50	53	50	257	51.4	3	
10:00	5	49	54	54	52	51	266	52.0	5	
30	6	52	55	53	54	54	268	53.6	3	
11:00	7	49	53	55	50	50	257	51.4	6	
30	8	51	50	50	53	51	255	51.0	3	
12:00	9	49	54	53	50	51	257	51.0	3	
30	10	47	48	49	45	48	237	47.4	4	
13:00	11	50	50	49	51	52	252	50.4	3	
30	12	52	49	48	49	46	244	48.8	6	
14:00	13	51	51	52	52	51	257	51.4	1	
30	14	54	57	54	55	55	275	55.0	3	
15:00	15	50	51	51	51	53	256	51.2	3	
30	16	52	46	52	50	52	252	50.4	6	
16:00	17	53	50	54	54	58	269	53.8	8	
30	18	49	50	54	52	52	254	50.8	3	
17:00	19	53	52	52	52	54	263	52.6	2	
30	20	45	50	55	55	56	261	52.2	11	
18:00	21	54	53	52	53	53	265	53.0	2	
30	22	50	50	49	53	52	254	50.8	4	
19:00	23	53	53	53	46	55	260	52.0	9	
30	24	57	54	55	54	55	275	55.0	3	
20:00	25	50	50	49	48	48	255	51.0	2	
<i>x̄</i> 控制图		<i>R</i> 控制图					计	1280.6	113	
LCL = <i>x̄</i> - <i>A</i> ₂ <i>R̄</i> = 48.6		UCL = <i>D</i> ₄ <i>R̄</i> = 9.54					<i>x̄</i> = 51.224 <i>R</i> = 4.52			
UCL = <i>x̄</i> + <i>A</i> ₂ <i>R̄</i> = 53.85		CL = <i>R̄</i> = 4.5					<i>n</i>	<i>A</i> ₂	<i>D</i> ₄	
CL = <i>x̄</i> = 51.2							5	0.58	2.11	

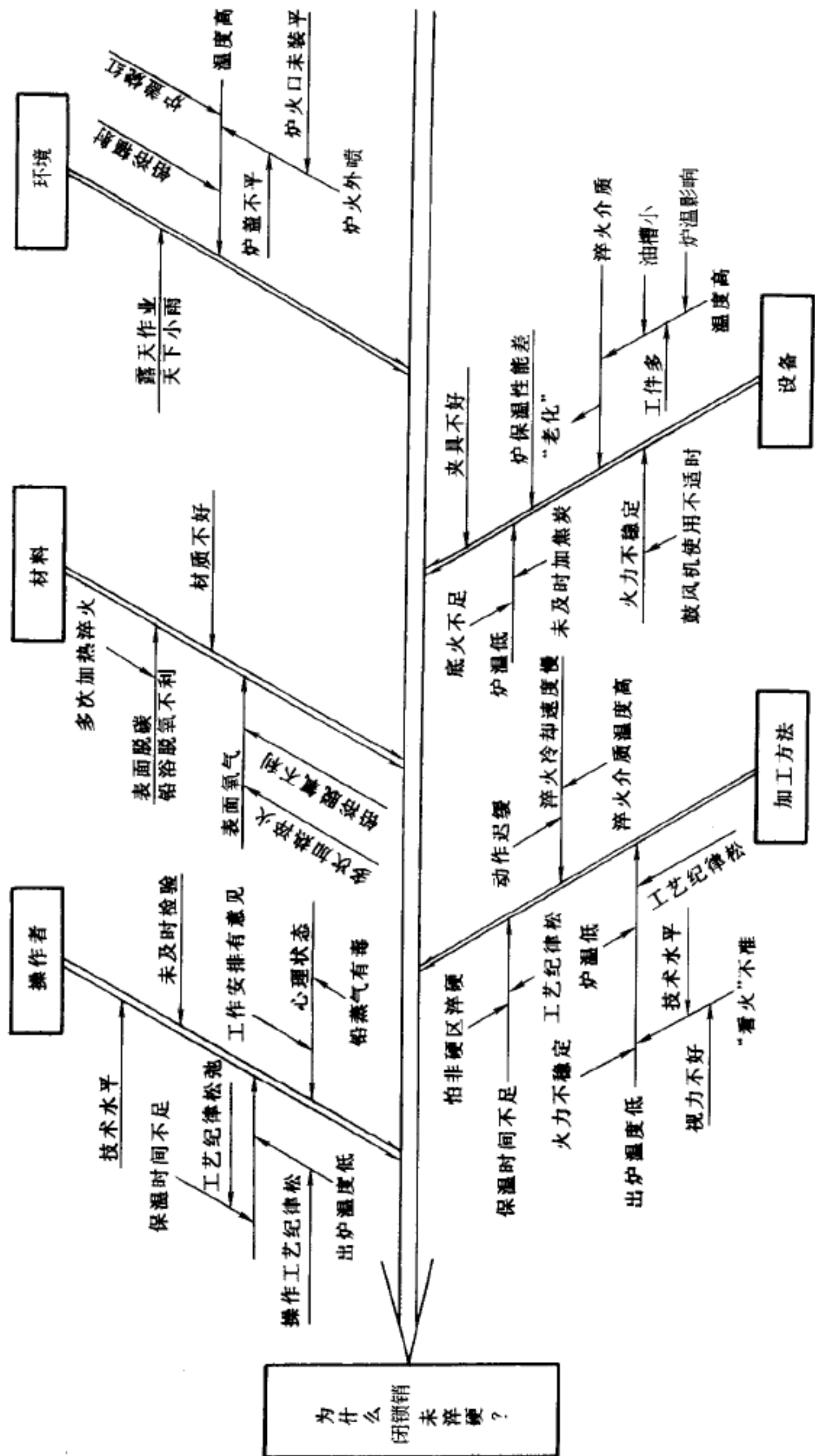


图 21-7 闭锁销未淬硬因果分析图

21.4 测温元件与仪表(表 21-35 ~ 表 21-71,图 21-8 和图 21-9)

表 21-35 标准热电偶的标称 Seeback 系数 (单位:mV/℃)

温度/℃	热 电 偶						
	E	J	K	R	S	T	B
- 190	27.3	24.2	17.1	—	—	17.1	—
- 100	44.8	41.4	30.6	—	—	28.4	—
0	58.5	50.2	39.4	—	—	38.0	—
200	74.5	55.8	40.0	8.8	8.5	53.0	2.0
400	80.0	56.3	42.3	10.5	9.5	—	4.0
600	81.0	58.5	42.6	11.5	10.3	—	6.0
800	78.5	64.3	41.0	12.3	11.0	—	7.7
1000	—	—	39.0	13.0	11.5	—	9.2
1200	—	—	36.5	13.8	12.0	—	10.3
1400	—	—	—	13.8	12.0	—	11.3
1600	—	—	—	—	11.8	—	11.6

表 21-36 不同丝径热电偶的允许使用的最高温度^①

ANSI 类型	美国线规(AWG)/mm			
	φ3.26	φ1.63	φ0.81	φ0.51
J	760	595	480	370
K	1260	1095	980	870
N	1260	1095	980	870
T	—	370	260	205
E	870	650	540	—
R	—	—	—	1455
S	—	—	—	1455
B	—	—	—	1705
C	—	—	—	2315

① 上列热电偶温度上限是针对端部封闭的保护管。

表 21-37 标准热电偶类型、使用温度和使用条件

ANSI 分类 通用名称	合金成分 (质量分数)(%)	推荐温度/℃	使 用 条 件
E 型 铬镍/康铜	镍铬 Ni-10Cr 康铜 46Ni-54Cu	- 200 ~ 900	真空和轻微氧化气氛,特别适用于超低温,在所有元件中具有最高单位度电势、镍铬是正极
J 型 铁/康铜	铁 纯铁 康铜 46Ni-54Cu	0 ~ 760	在推荐温度范围内是最佳选择,低温可靠性高、高于 500℃作为正极的铁迅速氧化、极廉价、在塑料工业应用广
K 型 镍铬/镍铝	镍铬 Ni-10Cr 镍铝 Ni-2Mn-2Al	- 200 ~ 1250	允许使用到最高温度,氧化气氛中稳定,还原介质中有腐蚀,一般需用保护管,镍铬是正极
N 型 镍铬硅/镍硅	镍铬硅 84Ni-14.2Cr-1.4Si 镍硅 95Ni-4.4Si-0.15Mg	- 200 ~ 1250	类似 K 型,比 K 型耐氧化,在 500℃比 K 型正极(镍铬)电势降小,镍铬硅是正极

(续)

ANSI 分类 通用名称	合金成分 (质量分数)(%)	推荐温度/℃	使用条件
T 型 铜/康铜	铜 纯铜 康铜 46Ni-54Cu	- 200 ~ 350	多用于食品工业、在低温比 E 型稳定, 有用于 - 269℃(氮沸点)的记录, 铜是正极
Ni-0.8Co/Ni-18Mo	—	- 200 ~ 1300	适用于真空、含氢气氛和环境, 在此条件下, 其他各类电偶都会损坏, 较高温度的电势输出极理想, 低于 120℃接近 K 型, 也可用 K 型丝, 该类电偶不用 ANSI 型号, Ni-0.8Co 是正极
R 型 Pt/Pt-13Rh	—	0 ~ 1450	用于高温, 铂与其他金属接触易污染, 需用陶瓷保护管, 在真空和还原性气氛很快损坏, Pt-13Rh 是正极
S 型 Pt/Pt-10Rh	—	0 ~ 1450	使用和条件接近 R、S 型, 多用于实验室。R 型多用于工业, S 型广泛用做工业传感器, Pt-10Rh 是阳极
B 型 Pt-6Rh/Pt-30Rh	—	870 ~ 1700	使用和条件接近 R 和 S, 在高温比 R、S 稳定, 电势输出极低, 低温线性很差, 通常不用于 250℃以下, Pt-30Rh 是正极
C 型 W-5Re/W-26Re	—	0 ~ 2315	必须在真空、氢或惰性气体中使用, W 不抗氧化, 在真空中有时用底部开口保护管, 也可用封口充 Ar 保护管。热电偶元件不可与金属接触, 否则易脆裂, 通常要考虑它的极限寿命。W-5Re 是阳极

表 21-38 常用热电偶的技术性能及主要特点

热电偶名称	分度号	型号	热电偶材料			100℃ 时电势 /mV	使用温度/℃		允许误差/℃			主要特点
			极性	识别	化学成分 (质量分数)(%)		长期	短期	温度范围/℃	级别	允 差	
铂铑 ₁₀ —铂	S	WRP	正	亮白、 较硬	Pt90, Rh10	0.645	1300	1600	0 ~ 1600	I	± 1℃或 ± [1 + (t - 1100) × 0.003]	高温下抗 氧化性好, 宜 在氧化或中 性气氛中使用, 不宜在还原气氛中使用
			负	亮白、 柔软	Pt100					II	± 1.5℃或 ± 0.25% t	
铂铑 ₁₃ —铂	R	WRQ	正	较硬	Pt87, Rh13		1300	1600	0 ~ 1600	I	± 1℃或 ± [1 + (t - 1100) × 0.003]	
			负	柔软	Pt100					II	± 1.5℃或 ± 0.25% t	

(续)

热电偶名称	分 度 号	型号	热电偶材料			100℃ 时电势 /mV	使用温度/℃		允许误差/℃			主要特点
			极 性	识别	化学成分 (质量分数)(%)		长期	短期	温度范 围/℃	级 别	允 差	
铂铑 ₃₀ —铂铑 ₆	B	WRR	正	较硬	Pt70, Rh30	0.033	1600	1800	600 ~ 1700	I	± 0.25 t % 或 1.5℃	除上述外, 冷端在 40℃ 以下不用修 正
			负	稍软	Pt94, Rh6					II	± 4℃ 或 ± 0.5% t	
镍铬—镍硅 (镍铬—镍铝)	K	WRN	正	暗绿不 亲磁	Cr9 ~ 10 Si0.4, Ni90	4.095	1200	1300	- 40 ~ + 1000	I	± 1.5℃ 或 ± 0.4% t	宜在氧化、 中性气氛及 真空中使用
			负	深灰稍 亲磁	Si2.5 ~ 3.0, Ni97, Co ≤ 0.6				- 40 ~ + 1200	II	± 2.5℃ 或 ± 0.75% t	
									- 200 ~ + 40	III	± 2.5℃ 或 ± 1.5% t	
镍铬硅—镍硅	N	WRM	—	—	—	—	—	—	—	—	—	性能与 WRN 相近
铜—康铜	T	WRC	正	褐红色	Cu100	4.277	350	400	- 40 ~ + 350	I	± 0.5℃ 或 ± 0.4% t	适用于氧 化、还原气氛 及真空,在氧 化气氛中不 宜超过 300℃, 在 - 200 ~ 0℃ 稳定 性很好
			负	亮黄	Ni45, Cu55				- 40 ~ + 350	II	± 1.0℃ 或 ± 0.75% t	
									- 200 ~ + 40	III	± 1.0℃ 或 ± 1.5% t	
铁—康铜	J	WRF	正	蓝黑亲磁	Fe100	5.268	600	750	- 40 ~ + 750	I	± 1.5℃ 或 ± 0.4% t	适用于氧 化、还原气氛 及真空,在氧 化气氛中不 宜超过 500℃
			负	亮黄不 亲磁	Cu40 ~ 60 合金					II	± 2.5℃ 或 ± 0.75% t	
镍铬—康铜	E	WRE	正	暗绿	Cr9 ~ 10, Si0.4 Ni90	6.317	750	850	- 40 ~ + 800	I	± 0.5℃ 或 ± 0.4% t	适用于 - 200 ~ + 800℃ 的氧化或中 性气氛,不适 用于还原气 氛
			负	亮黄	Cu40 ~ 60 合金				- 40 ~ + 900	II	± 2.5℃ 或 ± 0.75% t	
									- 200 ~ + 40	III	± 2.5℃ 或 ± 1.5% t	

表 21-39 特殊热电偶的技术性能和特点

名称	材 料		温度测量上限/℃		允许误差	特 点	用 途
	正极	负极	长期	短期	℃		
铂铑系	铂铑 13	铂铑 1	1450	1600	≤ 600 为 ± 3.0 > 600 为 $\pm 0.5\% t$	在高温下抗氧化性能、力学性能好，化学稳定性好，50℃以下热电势小，参考端可以不用温度补偿	各种高温测量
	铂铑 20	铂铑 6	1500	1700			
	铂铑 40	铂铑 20	1600	1850			
钨铼系	钨铼 3	钨铼 25	2000	2800	≤ 1000 为 ± 10 > 1000 为 $\pm 1.0\% t$	热电势大，与温度的关系线性好，适用于干燥氢气、真空和惰性气氛，热电势稳定，价格低	各种高温测量、钢液测量
	钨铼 5	钨铼 20	2000	2800			
非金属	碳	石墨	2400	—	—	热电势大，熔点高，价格低廉，但复现性差，机械强度低	耐火材料的高温测量
	硼化锆	碳化锆	2000				
	二硅化钨	二硅化钼	1700				

表 21-40 热电偶应答时间 (s) 随丝径和传热介质的变化

热电偶丝直径 /mm	静止空气 (426 ~ 37℃)	18m/s 的风 (426 ~ 37℃)	静止水 (93 ~ 37℃)
0.025	0.05	0.004	0.002
0.127	1.0	0.08	0.04
0.381	10.0	0.80	0.40
0.813	40.0	3.2	1.6

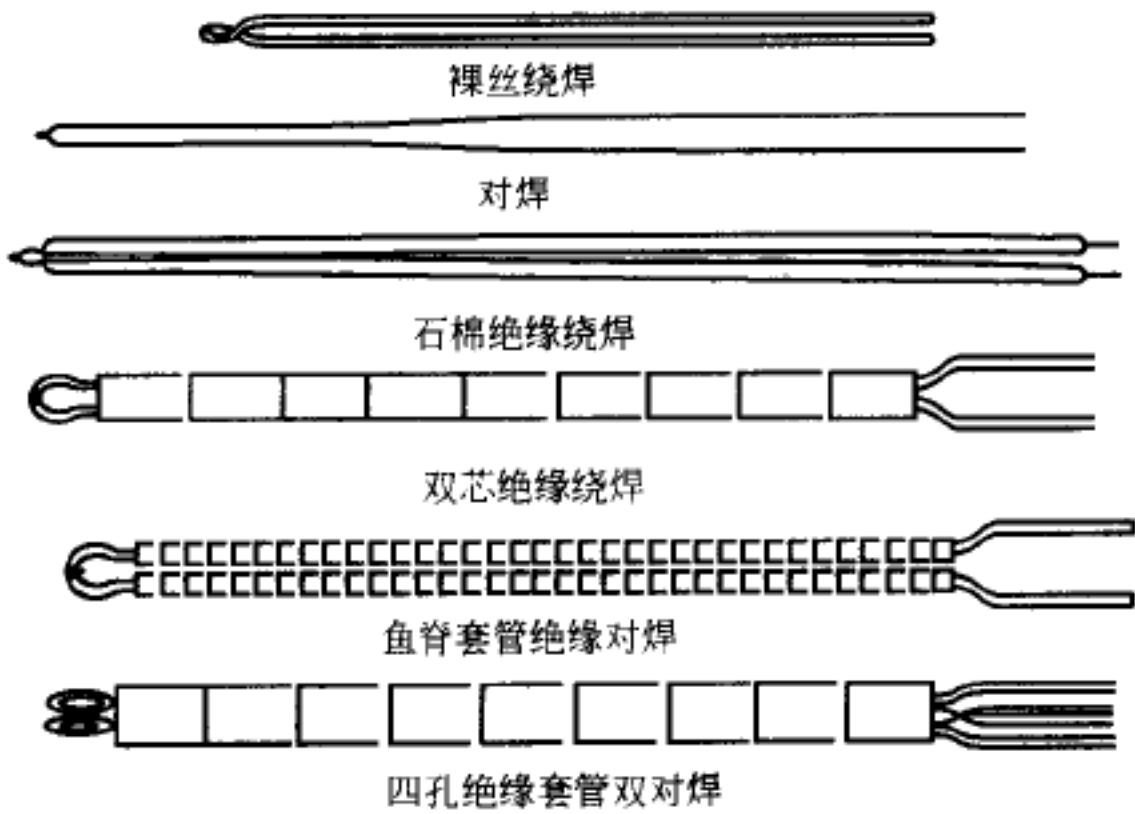
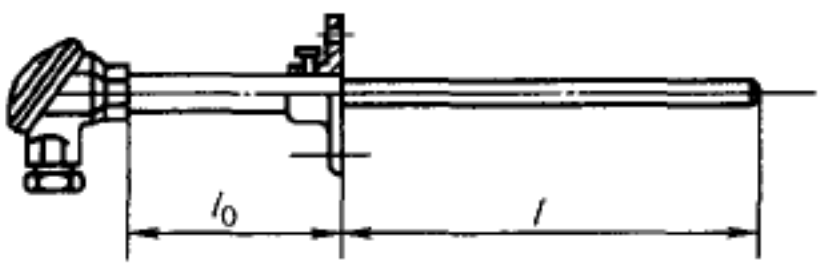
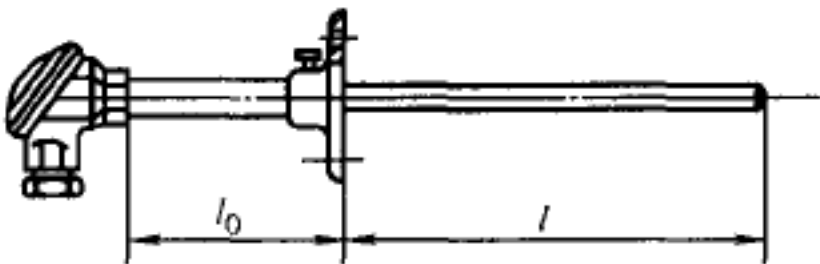
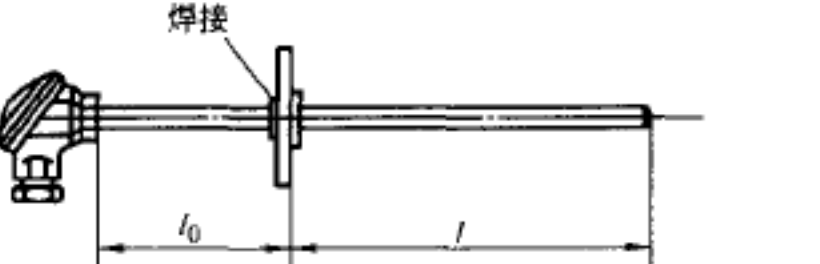
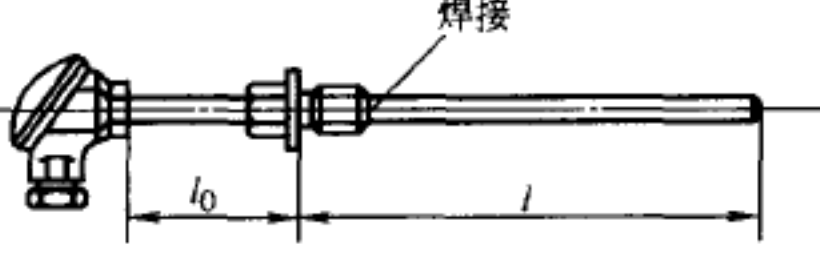
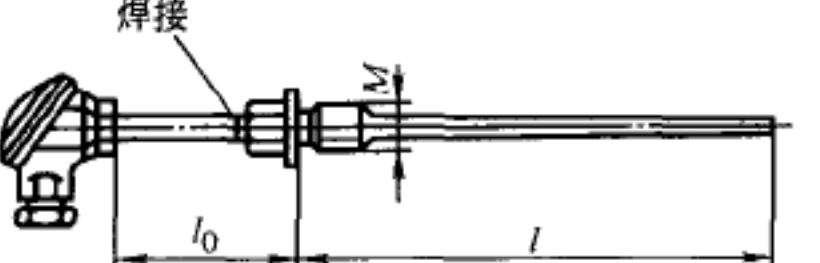
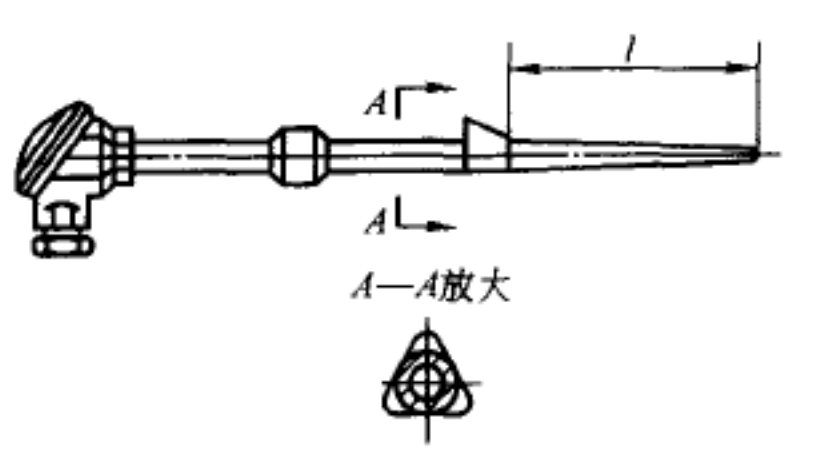
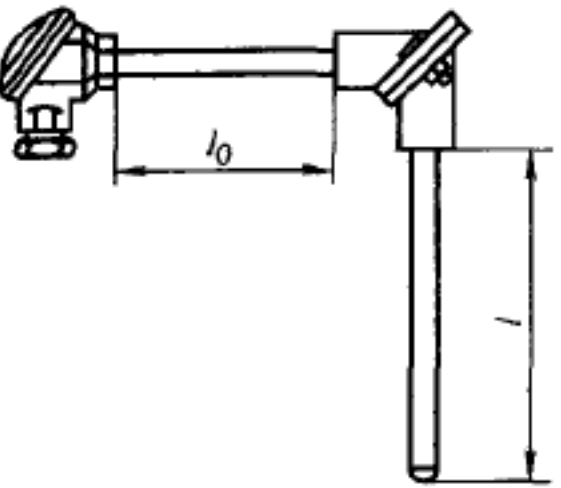


图 21-8 热电偶的组装方式

表 21-41 常用热电偶的结构形式及特点

保护管形状	固定装置形式	结构特点及用途	结构示意图
直形	无固定装置	保护管可以用金属或非金属两种，适用于常压设备及需要移动的或临时性的温度测量场所	 l_0 为非插入部分； l 为插入部分
		插入部分 l 为非金属保护管，不插入部分 l_0 为金属加固管 用途同上	

(续)

保护管形状	固定装置形式	结构特点及用途	结构示意图
直形	可动法兰带加固管	带可动法兰装置, 使用时法兰是固定在金属加固管 l_0 上, 插入部分为非金属保护管 适用于常压设备及需要移动的或临时性的温度测量场合	
	可动法兰	金属保护管带可动法兰, 适用于常压设备, 插入深度 l 可以移动调节	
	固定法兰	金属保护管固定法兰, 这种固定方法, 装拆方便, 可耐一定压力 (0~6.3MPa) 适用于有一定压力的静流或流速很小的液体, 气体或蒸汽等介质的温度测量	
	固定螺纹	金属保护管带固定螺纹, 特点和用途同上	
锥形	固定螺纹	锥形金属保护管带固定螺纹耐压力 19.6MPa, 可承受液体, 气体或蒸汽流速 80m/s 适用于有压力和流速的介质测温	
	焊接	锥形焊接金属保护管耐压 29.4MPa, 承受液体、气体, 蒸汽流速 80m/s 适用于主蒸汽管道	
直角形	焊接	直角弯形金属保护管, 横管长度 l_0 为 500mm 和 750mm, 适用于常压, 不能从设备的侧面开孔且顶上辐射热很高的设备中, 例如测量装有液体的加热炉的温度	

(续)

保护管形状	固定装置形式	结构特点及用途	结构示意图
直角形	可动法兰	直角弯形金属保护管，横管长 l_0 为 500mm 和 750mm 两种，适用于常压，不能从设备的侧面开孔且顶上辐射热很高的设备中。例如，测量装有液体或因其他原因必须在顶上测量温度的设备 带有可动法兰作为固定装置，插入深度可根据需要进行移动调节	

表 21-42 在各种工况下使用的热电偶保护管

材 料	最高使用温度/℃	特 性	典 型 应 用
AISI 304 不锈钢 (UNS S30400) (18-20Cr, 8-10.5Ni)	氧化介质 870 不氧化介质 1260	抗腐蚀性好，可用于蒸汽、油和多种化学溶液	食品加工、石油工业、化工过程（混合酸、乳酸、染缸）
AISI 316 不锈钢 (UNS S31600) (10-18Cr, 10-14Ni)	氧化 870	耐腐蚀、抗点蚀、比 304 不锈钢耐酸	石油工业、化工过程
AISI 446 不锈钢 (UNS S44600) (23-27Cr, ≤0.2C)	氧化 1095 不氧化 1260	耐高温腐蚀、抗含硫气体、盐浴、低熔点融盐腐蚀	高温淬火加热、渗氮、盐浴、玻璃上釉、非铁金属（Sn、Pb、Zn、铅锡合金）熔化、低温高炉
市售纯镍 (Ni99.5%)	氧化 1205 还原 540 中性 1315	不能用于含硫化物、常用于碱性物和熔盐、在氢气中加热管坯	1095℃ 的 KCN 盐浴、650℃ 以下的苛性碱盐化合物高温用
镍基合金 601 (UNS N06601) (23Cr, 60Ni)	氧化 1260	优异的耐高温腐蚀性，力学性能好，比 600 镍基合金抗硫性能好，有氢脆	高温热处理、渗碳、渗氮、盐浴、高炉、煤气发生炉、陶瓷窑
SAE1020 或 1018 低碳钢 (UNS G10200 或 10180)	氧化 540 不氧化 1095	低温使用经济，高温易形成氧化皮，用于非腐蚀性气氛	涂 Sn、非铁金属熔化、石油工业
低碳黑皮钢	675	非腐蚀性气氛和融熔金属，代替锻钢（熟铁）	退火、回火、发电厂预热器、食品烘箱、沥青混合器
金属陶瓷 (Cr77%、Al ₂ O ₃ 23% 注塑复合材料)	1370	<1370℃ 抗氧化性好，导热性和不锈钢同。<1150℃ 在融熔金属中稳定，不能用于熔铝。用贵金属热电偶时，陶瓷管是首选	高温热处理、<1150℃ 的铜合金熔化，高炉和 <1315℃ 烟气、含 S 燃烧器（1095℃），1205℃ 水泥窑、<1370℃ 化工反应器

(续)

材 料	最高使用温度/℃	特 性	典 型 应 用
铸铁	氧化 540 不氧化 1095	< 870℃ 还原性气氛、能经受硫酸和苛性碱液，用于熔铝或压铸金属，每日需涂一次白粉、为延长寿命需涂特殊涂层	化工、熔铝和压铸金属
莫来石 ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)	1595	耐高温气体作用，抗热振性好，但不耐机械冲击。常需双保护管，应立放，在 BaCl_2 熔盐中可用到 1290℃	陶瓷工业、光亮退火、锻热炉、玻璃炉、高速钢盐浴
氧化铝 (99.8% Al_2O_3)	1870	耐热振、机械冲击性尚可用于温度极高的工艺过程，在气氛中能经受到 1760℃	1760℃ 感应加热熔炼，金属和陶瓷工业的极端高温过程
碳化硅 ($\text{SiC}90\%$, $\text{SiO}_2 9\%$)	1650	可用于抗热振的二级（次）保护管	陶瓷块和砖、钢的均热坑，抗火焰和气体侵蚀，抗融熔非铁金属侵蚀
搪陶瓷（玻璃纤维布、 SiC 喷嘴的陶瓷涂层）	925	抗熔铝和其他非铁液体侵蚀不污染环境、抗热振和机械冲击、受热变脆（要求仔细维护）	熔铝和其他非铁金属
低碳钢覆 SiC	870	融熔非铁金属	液态 Sn 、 Zn 、 Pb 、 Al

表 21-43 铠装热电偶测量端的结构形式


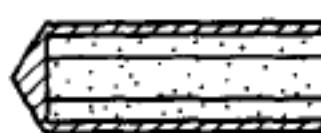
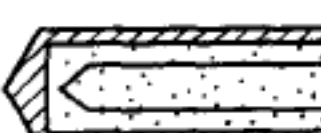

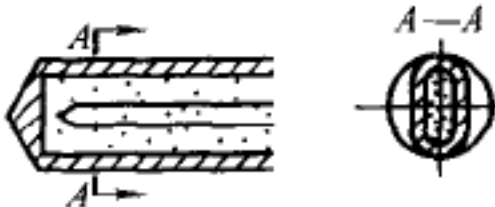
测量端形式	特 点	用 途	示 意 图
露端型	1. 结构简单 2. 时间常数小，反应快 3. 偶丝与被测介质接触，使用寿命短	适于温度不高，要求反应速度快，对热电偶不产生腐蚀作用的介质	
接壳型	1. 时间常数较露端型大 2. 偶丝不受被测介质腐蚀，寿命较露端型长	适于测量温度较高，要求反应速度较快，压力较高，并有一定腐蚀性的介质	
绝缘型	1. 时间常数较上述均大 2. 偶丝与金属套管绝缘，不与被测介质接触，寿命长	适于测量温度高，压力高及腐蚀性较强的介质，尤其适于对电绝缘性较好的生产设备	
圆变截面型 (可制成接壳 或绝缘型)	套管端头部分的直径为原直径的 1/2 时间常数更小	适于要求反应速度快，有较大机械强度或安装孔较小的温度测量设备	
扁变截面型 (可制成接壳 或绝缘型)	反应速度更快	适于安装孔为扁形的温度测量设备	

表 21-44 不同套管材料的铠装热电偶及其使用温度

金属套管材料	外 径/mm							
	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0
	使用温度/℃							
铜 (H62)	200	250	300	300	350	350	400	400
不锈钢 (1Cr18Ni9Ti)	500	500	550	600	600	700	700	800
不锈钢 (1Cr18Ni9Nb)	600	650	700	700	800	800	900	900
高温合金 (Cr25Ni20)	650	700	750	800	900	950	1000	1000
镍基高温合金 (GH30)	700	800	850	900	1000	1100	1100	1150
镍基高温合金 (GH39)	850	900	1000	1100	1100	1150	1200	1200

注：铠装热电偶的使用温度不仅与金属套管的材料及直径有关，也与偶丝种类有关，表中数据仅指常用金属套管镍铬-镍硅铠装热电偶的使用温度。

表 21-45 WBJ 系列冷端补偿器主要技术参数

产品型号	配用热电偶分度号	电桥平衡温度 /℃	冷端温度 补偿范围 /℃	补偿误差	电源电压 /V
WBJ—1E	E	0	0 ~ +50	环境温度 (20 ± 5)℃ 时, 固定补偿误差 ± 1℃ 环境每改变 10℃, 补偿误差增加 0.5℃	AC 50Hz 220
WBJ—1K	K				
WBJ—1S	S				

表 21-46 补偿导线色别及允差

型号	配用热电偶	极 性			允 差									
					100℃（一般用）					200℃（耐热用）				
		极性	电极材料	色别	热电势 /mV	允 差				热电势 /mV	允 差			
						普通级		精密级			普通级		精密级	
/mV	/℃					/mV	/℃	/mV	/℃		/mV	/℃		
SC	铂铑 10—铂	正	SPC	红	0.645	± 0.037	5	± 0.023	3	1.440	± 0.037	5	—	—
		负	SNC	绿										
KC	镍铬—镍硅	正	KPC	红	4.095	± 0.105	2.5	± 0.063	1.5	—	—	—	—	—
		负	KNC	蓝										
KX	镍铬—镍硅	正	KPX	红	4.095	± 0.105	2.5	± 0.063	1.5	8.137	± 0.100	2.5	± 0.060	1.5
		负	KNX	黑										
EX	镍铬—康铜	正	EPX	红	6.317	± 0.170	2.5	± 0.102	1.5	13.419	± 0.183	2.5	± 0.111	1.5
		负	ENX	棕										
JX	铁—康铜	正	JPX	红	5.268	± 0.135	2.5	± 0.081	1.5	10.777	± 0.138	2.5	± 0.083	1.5
		负	JNX	紫										
TX	铜—康铜	正	TPX	红	4.277	± 0.017	1	± 0.023	0.5	9.286	± 0.053	1	± 0.027	0.5
		负	TNX	白										
RC	铂铑 13—铂	正	RPC		0.647					1.468				
		负	RNC											

表 21-47 补偿导线的规格

温度等级	线芯种类	股数	单线直径 /mm	标称截面 /mm ²	绝缘厚度 /mm	护套厚度 /mm	最大外径/mm × mm	
							单股线芯	多股线芯
80 ~ 100℃	单股线芯	1	0.8	0.5	0.5	0.8	3.7 × 6.4	3.9 × 6.6
		1	1.13	1.0	0.7	1.0	5.0 × 7.7	5.1 × 8.0
		1	1.37	1.5	0.7	1.0	5.2 × 8.3	5.5 × 8.7
		1	1.76	2.5	0.7	1.0	5.7 × 9.2	5.9 × 9.7
150℃	软型线芯	7	0.3	0.5	0.5	0.3	2.6 × 4.6	2.8 × 4.8
		7	0.43	1.0	0.5	0.3	3.0 × 5.3	3.1 × 5.6
		7	0.52	1.5	0.5	0.3	3.2 × 5.8	3.1 × 6.2
		19	0.41	2.5	0.5	0.3	3.6 × 6.7	4.0 × 7.3

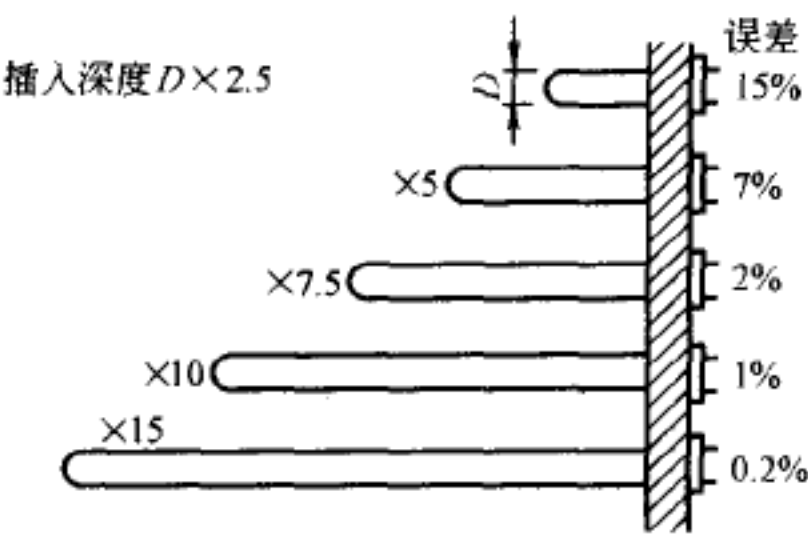


图 21-9 热电偶插入炉膛深度
对炉温测量误差的影响

表 21-48 WZ 系列热电阻主要技术参数

分度号	0℃时的公称 电阻值/Ω	电阻比 R100/R	测温范围, 精度等级和允差		热响应时间 /s	绝缘电阻 /MΩ
			测温范围/℃	精度等级和允差		
Pt10 Pt100 Cu50	10 100 50	1.385	陶瓷元件 - 200 ~ + 600 玻璃元件 - 200 ~ + 500 云母元件 - 200 ~ + 420	A 级 ± (0.15 + 0.2% t) B 级 ± (0.3 + 0.5% t)	φ12mm 和 φ16mm 保护 管为 30 ~ 90 锥形不锈钢为 90 ~ 180	≥ 100
Cu100	100	1.428	- 50 ~ + 100	± (0.3 + 0.006 t)	< 180	≥ 50

表 21-49 几种半导体温度传感器的技术参数和配套仪表

感温元件	配套仪表	测温范围/℃	测温上限/℃
热敏电阻	95 型和 7151 型半导体点温计 热敏电阻温度指示控制仪	- 80 ~ + 20 - 50 ~ + 50 0 ~ 50 0 ~ 100 0 ~ 200 0 ~ 300	350
高灵敏度硅 PN 结	SWY—2 型袖珍数字测温仪 ZWY—2 型智能温度巡检仪	- 40 ~ + 100	巡检路数 31 巡检周期 2 × 31 ~ 6 × 31s

表 21-50 常用玻璃温度计的型号、规格

用途	型号	结构	使用液体	测温范围/℃
实验室用	WLS—201	棒式	水银	-30 ~ 20, 0 ~ 50, 50 ~ 100, 100 ~ 150, 150 ~ 200, 200 ~ 250, 250 ~ 300
工业用	WNG—01 WNG—02 WNG—03	棒式	水银	-30 ~ 50, 0 ~ 50, 0 ~ 100, 0 ~ 150, 0 ~ 200, 0 ~ 300, 0 ~ 400, 0 ~ 500
	WNG—11 WNG—12 WNG—13	内标式	水银	
	WNY—01 WNY—02 WNY—03	棒式	有机液体	-50 ~ 30, -80 ~ 30, -30 ~ 50, 0 ~ 50, 0 ~ 70, 0 ~ 100
	WNY—11 WNY—12 WNY—13	内标式	有机液体	

表 21-51 常用压力温度计的型号规格

型 号	结构型式	附加装置	精度等级	测温范围/℃
WTQ—270	指示式	无	1.5	0 ~ 120, 0 ~ 160 0 ~ 200, 0 ~ 300
WTQ—278	指示式	电接点	2.5	
WTQ—280	指示式	无	2.5	-80 ~ 40, -60 ~ 40, 0 ~ 200, 0 ~ 250, 0 ~ 300, 0 ~ 400
WTQ—288	指示式	电接点	2.5	
WTQ—410 WTQ—610	自动 记录式	无	1.5	0 ~ 120, 0 ~ 160, 0 ~ 200, 0 ~ 300
WTQ—618	自动 记录式	电接点	2.5	

表 21-52 常用双金属片的牌号、成分及特性

牌号	组合金属化学成分		膨胀系数/ $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$		线性温度范围 /℃	适用测量范围 /℃
	主动层	被动层	主动层	被动层		
5J11	Mn75Ni15Cu10	Ni36 余 Fe	28	1.5	20 ~ 180	0 ~ 150
5J18	3Mi24Cr2 余 Fe	Ni36 余 Fe	18	1.5	-20 ~ 180	0 ~ 200
5J19	Ni20Mn7 余 Fe	Ni34 余 Fe	20	1.68	-50 ~ 100	-80 ~ 80
5J23	Ni19Cr11 余 Fe	Ni42 余 Fe	16.5	5.3	0 ~ 300	0 ~ 300
5J25	3Ni24Cr2 余 Fe	Ni50 余 Fe	18	9.7	0 ~ 450	0 ~ 400
RSG2	Ni10Cr12Mn16 余 Fe	Cr23Cu 余 Fe	—	—	70 ~ 650	0 ~ 600

表 21-53 常用显示仪表的类型和特性

类 别	结构形式	主要功能	型号
模拟量显示仪表	动圈式	指示仪	XCZ
		调节仪	XCT
	自动平衡式	电子电位差计	XW
		电子平衡电桥 { 直流 交流	XQ XD
		电子差动仪	
数字量显示仪表	数字式	显示仪	XMZ
		显示调节仪	XMT
	图像字符显示	数字式 视频式	简称 CRT

表 21-54 常用力矩电动机式温度指示调节仪型号

型 号	检测元件 为热电偶 或辐射减 温器	XBW— 001 单针 指示	XBW— 002 色带 指示	XBW— 003 单针并 记录	XBW— 101 单针 指示	XBW— 102 色带 指示	XBW— 103 单针并 记录	XBW— 201 单针 指示	XBW— 202 色带 指示	XBW— 203 单针并 记录	XBW— 301 单针 指示	XBW— 302 色带 指示	XBW— 303 单针并 记录
号	检测元件 为热电偶	XBD— 001 单针 指示	XBD— 002 色带 指示	XBD— 003 单针并 记录	XBD— 101 单针 指示	XBD— 102 色带 指示	XBD— 103 单针并 记录	XBD— 201 单针 指示	XBD— 202 色带 指示	XBD— 203 单针并 记录	XBD— 301 单针 指示	XBD— 302 色带 指示	XBD— 303 单针并 记录
附加调节 装置类型		无			三位电接点			电阻发信			电动 PID		

表 21-55 WMNK 系列控制仪主要技术参数

产品型号	控温范围 /℃	显示和给 定分辨率 /℃	控温 灵敏度 /℃	显示和给 定精度 /℃	回差控制 ^①	电源电压 /V	整机功率 /VA	输出触头 容量
WMNK—□A	-50 ~ 150	1	0.3	±2	0、2、4、6、8、C 五档切换	AC50Hz 220% ± 10%	< 6	一对转换 触头 AC220V5A AC380V4A
WMNK—□B	0 ~ 50	0.1	0.2	±0.7				
WMNK—□C	0 ~ 99.9			±1				
WMNK—□D	0 ~ 100	1	0.5	±3				
WMNK—□E	0 ~ 200			±5				
WMNK—□F	0 ~ 300			±10				

① 回差控制说明：假设把拨码盘设定温度为 30℃，回差设定为 4℃，则当温度上升到 30℃时控制仪动作（断电）。当温度低于 30℃高于 25℃时，控制器继续断电，只有温度低于设定值减去回差值（26℃）时，控制仪动作（通电），如此往复工作。

表 21-56 XTMA—2000 系列调节仪主要技术参数

产品型号	设定精度	显示精度	偏差指示范围 (%)	触头输出容量	直流输出信号	电源电压
XTMA—2□□□	0.5 级	0.5 级	±2.5	220V 3A	0~10mA ($R_L \leq 1k\Omega$) 或 4~20mA ($R_L < 500\Omega$)	AC50Hz 220V

表 21-57 EKS 系列调节器主要技术参数

参数名称	技术指标	参数名称	技术指标
设定精度	±0.5% FS 以下	时间精度	设定时间的 ±0.02%
设定范围	0~FS (分辨率为 1 个字)	程序循环次数	每组 0~9999 次
指示精度	±0.5% ±1 个字	手动输出范围	0~100% (分辨率 1%)
控制周期	0~98s (分辨率 1s) 最小 1/8s	安全阀位范围	0~100% (分辨率 1%, 只对电流输出型)
采样周期	100ms	可编程辅助输出方式	连续、脉冲 (1s) 随动定时 (时间可编程)
比例带	1~100% FS (分辨率 100%)	调节方式	ON/OFF、P、PI, 微分先行 PID, 串级 PID
积分时间	1~3999s (分辨率 1s)	程序起动延缓时间	0~99h59min (分辨率 1min)
微分时间	1~3999s (分辨率 1s)	输出限幅范围	0~100% (分辨率 1%)
积分分离带	0~100% (分辨率 1%)	存储数据保存	锂电池 3V, 型号 CR2016 (寿命 > 2 年)
报警设定范围	0~100% FS 或 $SV \pm A$ (A 为偏差报警值)	电源电压	AC220V ± 10% 或 DC24V ± 10%
程序设定容量	最大 8 组 × 10 段	功耗	< 20W
程序设定时间	每步 0~99h59min (分辨率 1min)		
程序设定方法	采用折线方式 (填表式结构)		
程序设定变更周期	1min		

表 21-58 EKS 系列调节器主要功能表

功能名称	功能说明
程序设定	用户只设定执行时间和目标温度就能用折线方式设定任意的升温工艺过程
程序设定的组连接及反复	可将设定折线分成最大 8 组, 每组最多 10 段, 分别输入 EKS, 每组可独立设定循环次数 0~9999 次, 组与组之间可任意连接
程序设定开始时间	输入后的折线设定程序, 可设定延时起动时间
可编程序辅助输出	EKS 具有两路可编程输出接点, 可设定为报警输出或辅助输出, 做出辅助输出工作时, 通过编程可使之成为折线, 设定控制同步的输出形式, 包括连续输出、节点脉冲输出及定时输出几种方式, 从而可以进行主控回路以外的其他控制对象的同步控制
报警方式	EKS 具有上限报警、下限报警、上下限报警和偏差报警四种报警工作方式, 可任选其中一种 (对串级系统, 报警分为主环报警, 副环无报警)
输出限幅	EKS 可预先设定输出量限制值, 保证自动输出值不超过规定的范围 (对手动输出无效)
反动作与正动作	反动作是指当温度比设定值低时, 提高输出量的动作方式, 一般用于加热系统, 与此相反, 即为正动作, 一般用于冷却系统
手动输出	EKS 具有手动控制输出能力, 通常键盘可实现自动↔手动平衡、无扰动切换 (也可通过工作方式设置 DIP 取消该功能)
安全阀位系统	EKS 具有动态、自诊断及故障状态下安全输出系统。一旦系统出现故障, 则自动切入安全系统, 开关量输出全部 OFF, 电流输出为预设安全阀位置

(续)

功能名称	功能说明
电源再投入时动作	EKS 程序运行过程中发生停电时, 若设定程序为初始状态, 则通电后, 程序从头执行; 若设定程序为连续方式, 则通电后从停电时的状态继续执行程序
数字滤波	EKS 可通过数字滤波对输入的急剧变化起延迟响应的作用, 对温度这种缓变信号, 选择合适的滤波系统, 可有效地抵抗现场各种电噪声及杂波的干扰, 使系统控制稳定 EKS 的滤波器采用等斜率方式, 延迟时间与信号阶跃幅值成正比, 因此无论采用多大的滤波系统, 系统都能对缓变的温度信号及时响应, 而这样又能对阶跃信号延迟响应, 因而即提高了系统的抗干扰能力, 又不降低系统对有用信号的影响能力
串级系统	EKS 本机具有一路标准信号输入, 可通过键盘设定组成一路串级系统, 串级系统允许软件设定为串级开方
传送输出	EKS 具有与控制动作完全独立的电流传送输出能力 (只有当主控制动作选用开关型输出时才能将电流输出端软件设定为传送输出端)。输出为标准 4 ~ 20mA。通过键盘设定通信码, 可将传送输出设定为所需信号 1. 把传送输出方式设定为当前温度输出, 若接记录仪, 可记录控制温度曲线 2. 把传送输出方式设定为现在目标温度输出, 则可做为程序设定器使用, 为其他温控器提供设定值 3. 对于串级系统, 把传送输出方式设定为现在串级输入值输出, 若接记录仪, 可记录副回路测量值。传送输出值均以传送输出信号的满量程 (FS) 为 20mA 线性输出

表 21-59 XMT 系列数字调节仪主要技术参数

产品型号	XMT—10	XMT—20	XMT—30	XMT—40
测量值显示	3½位 LED 数码管	4 位 LED 数码管		
设定值显示	3½位 LED 数码管	4 位 LED 数码管		
测量值设定值范围	0 ~ 100% FS			
测量值显示误差	± 0.5% FS ± 1	± 0.3% FS ± 1		
设定点误差	± 0.5% FS ± 1			
调节方式 PID	P: 1% ~ 50% FS I: 20s ~ 9min D: 0 ~ 3min	P: 1% ~ 100% FS I: 1 ~ 3600s D: 1 ~ 1200s		P: 0.1% ~ 100% I: 0.1 ~ 1000s D: 0.1 ~ 500s
输入信号源阻抗	热电偶 < 100Ω, 热电阻 < 2.5Ω		热电偶 < 100Ω, 热电阻 < 2.5Ω, 电压输入 < 100Ω	热电偶 < 100Ω 热电阻 < 2.5Ω
输入采样		400ms	500ms	
其他技术参数	上限报警 HI 设定范围 + 3% ~ + 50% FS 上限报警方式: 红色 LED 发光二极管亮, 同时继电器接点输出 下限报警方式: 绿色 LED 发光二极管亮, 同时继电器接点输出 继电器触头容量 AC220V2A DC27V3A	附加功能: 事件 EV ₁ 、事件 EV ₂ 输出 事件输出种类, 测量值 PV, 偏差值 DEV, 偏差绝对值 IDEVI 三种中任选两种设定范围 PV: 0 ~ 100% FS DEV: - 50% ~ + 50% FS IDEVI: 0 ~ 50% FS 事件输出方式: 继电器输出 触头容量: AC220V2A	数字滤波 0 ~ 255s 可变开平方运算 (4 ~ 20mA, 1 ~ 5V 输入) 漏失 0 ~ 10% 可变偏位运算 - 50% ~ + 50% FS 比率运算 0 ~ 9999 可实现手动/自动切换双向平衡无扰动切换, 调节方式自整定辅助功能, 事件输出在 PV、DEV、IDEVI 中任选两种 (与 MT—20 型相同) 继电器输出	具有事件输出功能, 输出范围 4 ~ 20mA, 0 ~ 10mA 手动输出由按键控制 附加功能: 上下限报警设定范围 0 ~ 100% FS 上下限偏差报警范围 0 ~ 100% FS 6 组时间开关接点设定 0 ~ 9999min 或 0 ~ 999h

表 21-60 辐射感温器的型号与规格

产品型号	测温范围 /℃		基本允许误差 /℃		环境温度如下时允许 变化值/℃						工作距离 /mm	配用显示仪器
	石英玻璃 透镜 (分度号 T ₁)	K ₉ 玻璃 透镜 (分度号 T ₂)	测温范围	误差值	10	20	40	60	90	100		
WFT—101 (反射式)	100 ~ 400		100 ~ 400	± 8	± 3	0	± 4	± 8			500 ~ 1500	电子自动电 位差计
	400 ~ 800		400 ± 800	± 12								动圈式仪表
WFT—201 (透镜式)	400 ~ 1000 600 ~ 1200	700 ~ 1400 900 ~ 1800 1100 ~ 2000			(带有水冷装置)						500 ~ 1500	电子自动电 位差计
WFT—202 (透镜式)	400 ~ 1000 600 ~ 1200	700 ~ 1400 900 ~ 1800 1100 ~ 2000	< 700	± 12	± 3	0	± 4	± 8	± 13	± 18	500 ~ 2000	电子自动电 位差计
			< 900 < 1100 > 1100	± 14 ± 18 ± 22								动圈式仪表 或电子自动电 位差计

表 21-61 灯丝隐灭式光学高温计的型号与规格

型 号	测量范围 /℃	量程号	吸收玻璃 旋钮位置	允许基本误差/℃		测量线路类型
WGG2—201	700 ~ 2000	1	15	700 ~ 800	± 33	电压式
				800 ~ 1500	± 22	
		2	20	1200 ~ 2000	± 30	
WGJ2—202	800 ~ 2000	1	1	800 ~ 1500	± 8	电桥式
		2	2	1200 ~ 2000	± 13	
WGG2—202	700 ~ 2000	1	15	700 ~ 1500	± 13	电桥式
		2	20	1200 ~ 2000	± 20	
WGG2—302	700 ~ 3000	1	15	700 ~ 1500	± 13	电桥式
		2	30	1200 ~ 3000	± 47	
WGJ3—301 (非整体结构)	700 ~ 3000	1	15	700 ~ 1500	± 13	电桥式
		2	20	1200 ~ 2000	± 20	
		3	30	1600 ~ 3000	± 47	

表 21-62 常见材料在 0.66 μm 波长下的单色黑度 $\epsilon(\lambda, T)$ 值

材料名称	表面无氧化层		有氧化层光洁表面
	固态	液态	
铝	—	—	0.22 ~ 0.4
铂	0.3	0.38	—
金	0.14	0.22	—
铜	0.1	0.15	0.6 ~ 0.8
铁	0.35	0.37	0.63 ~ 0.98
铸铁	0.37	0.4	0.7
钢	0.35	0.4 ~ 0.68	0.68 ~ 1.0
碳	0.93	—	—
陶瓷	0.25 ~ 0.5	—	—
粉末石墨	0.95	—	—

表 21-63 由亮度温度到真实温度的修正值 ($\lambda = 0.66\mu\text{m}$)

亮度温度 /°C	在各种 $\epsilon(\lambda, T)$ 下的修正值 $\Delta T/^\circ\text{C}$								
	$\epsilon = 0.9$	$\epsilon = 0.8$	$\epsilon = 0.70$	$\epsilon = 0.60$	$\epsilon = 0.50$	$\epsilon = 0.40$	$\epsilon = 0.30$	$\epsilon = 0.20$	$\epsilon = 0.10$
800	6	12	19	28	38	51	68	92	137
1000	8	17	27	39	54	72	96	132	198
1200	11	23	36	53	72	97	130	180	271
1400	14	29	47	68	94	127	170	236	359
1600	17	37	59	96	119	160	216	301	462
1800	21	45	73	106	146	198	268	375	581
2000	25	54	88	128	177	240	326	458	718
2200	30	64	104	152	211	287	391	552	874

表 21-64 Q 系列 R 系列红外探测器及配套控制器主要技术参数

红外探测器型号	配套控制器型号	测温范围 /℃	分度号	透镜 孔径 /mm	聚焦 距离 /mm	视场 角弧 度	工作波段 /μm	125mm 变 型的最小 目标尺寸 /mm	检测 精度 (%)	达到 98% 时响应 时间
OQM4/7.5C35P450X	ZM—QM4/7.5C	400 ~ 750	Q200C	35	450	1/12	0.7 ~ 1.1	10	0.6	5ms
OQM5/9C35P600	ZM—QM5/9C	500 ~ 900	Q201C		600	1/18		7		
NQM5/9C35P1200					1200	1/32		4		
LQM5/9C18P250				18	250	1/14		10		
OQO6/11C35P1200	ZM—QO6/11C	600 ~ 1100	Q202C	35	1200	1/32	0.5 ~ 1.1	4		
NQO6/11C16P1200X				16		1/65		1.7		
LQO6/11C18P600				18	600	1/33		4		
OQO7/13C22P1200	ZM—QO7/13C	700 ~ 1300	Q203C	22	1200	1/50		2.5		
NQO7/13C10P1200X				10		1/85		1		
LQO7/13C12P600				12	600	1/50		3		

(续)

红外探测器型号	配套控制器型号	测温范围 /℃	分度号	透镜 孔径 /mm	聚焦 距离 /mm	视场 角弧 度	工作波段 /μm	125mm 变 型的最小 目标尺寸 /mm	检测 精度 (%)	达到 98% 时响应 时间						
OQ08/15C18P1200	ZM—Q08/15C	800 ~ 1500	Q204C	18	1200	1/65	0.5 ~ 1.1	2	0.6	5ms						
NQ08/15C8P1200X				8		1/100		0.8								
LQ08/15C9P600				9	600	1/66		2.5								
OQ09/18C11P1200	ZM—Q09/18C	900 ~ 1800	Q205C	11	1200	1/85		1.2			0.6	5ms				
NQ09/18C5P1200X				5		1/180		0.5								
LQ09/18C6P600				6	600	1/100		1.5								
OQ010/20C9P1200	ZM—Q010/20C	1000 ~ 2000	Q206C	9	1200	1/125		0.9					0.6	5ms		
NQ010/20C4P1200X				4		1/210		0.4								
LQ010/20C5P600				5	600	1/120		1.5								
OQ015/25C7P1200	ZM—Q015/25C	1500 ~ 2500	Q207C	7	1200	1/160		0.7							0.6	5ms
NQ015/25C3P1200X				3		1/250		0.3								
LQ015/25C4P600				4	600	1/150		1								
OQ010/1735P1200	ZM—Q010/17C	1000 ~ 1700	Q255C	35	1200	1/32	0.4 ~ 0.6	4	2s							
O—R—GLO/3C35P75	ZM—GL0/3C	0 ~ 300	R200C		75	1/2	0.7 ~ 1.2	64								
N—R06/16C35P600	ZM—R06/16C	600 ~ 1600	R201C		600	1/15	0.4 ~ 2.8	9								
N—R—GG4/12C35P600	ZM—RGG4/12C	400 ~ 1200	R202C				4.3 ~ 8	37								
N—R—GU4/12C35P600	ZM—RGU4/12C		R203C				2.7 ~ 4.7									
N—R—GN3/6C35P600	ZM—RGV3/6C	300 ~ 600	R204C				2.7 ~ 8	35		0.8						

表 21-65 光电高温计的主要规格

名称和型号	测量范围/℃	距离系数	光敏元件	附加调节型式
WDL—2 型光电高温计	700 ~ 1300, 1100 ~ 2000	1/40	硅光电池	
WDK 光电温度控制器	750 ~ 1000, 900 ~ 1200	1/10 ~ 1/15	硒化镉光敏电阻	二位电接点
WDH—1 型光电高温计	300 ~ 600, 400 ~ 700	1/30	硫化铅光敏电阻	
	700 ~ 1000, 800 ~ 1200 900 ~ 1400, 1000 ~ 1500		硅光电池	
WDH—2 型光电高温计	100 ~ 250, 250 ~ 500	1/40	硫化铅光敏电阻	二位电接点、 电动 PID
	400 ~ 800	1/90		
	700 ~ 1100, 900 ~ 1200 1000 ~ 1600	1/70 1/275	硅光电池	
YT—GD—1 型光电测温控温仪	700 ~ 1200, 800 ~ 1300 900 ~ 1400, 700 ~ 2000	1/100	硅光电池	电动 PID ≥ ±1.5V

表 21-66 Y 系列红外温度计主要技术参数

技术参数	测量精度	重现性	分辨率	温度系数	供电电压	输出电流	负载电阻	辐射系数
技术数据	$\pm 0.75\% \text{FS}$ $\pm 1\text{C}$	$\pm 0.3\% \text{FS}$	$0.08\% \text{FS}$	$0.05\% 1\text{C}$	DC24V (16~40V)	DC 4~20mA	DC24V 400 Ω DC20V 700 Ω	0.01~0.88 数字设定

表 21-67 JZD1 系列中间继电器主要技术参数

产品型号	额定 工作 电压 /V	约定 发热 电流 /A	额定工作电流/A			额定操 作频率 /(次/h)	机械 寿命 /万次	电气 寿命 /万次	线圈 功耗	辅助触头数		参考价 (元/台)
			AC—5		DC—13					NO	NC	
			220V	380V	220V							
JZD1—22/OA□	380	10	1.9	3.3	0.13	1200	1000	30	< 2VA	2	2	35
JZD1—31/OA□										3	1	
JZD1—40/OA□										4	0	
JZD1—22/OB□									1.2W	2	2	
JZD1—31/OB□										3	1	
JZD1—40/OB□										4	0	
JZD1—44/OA□									< 2VA	4	4	45
JZD1—53/OA□										5	3	
JZD1—62/OA□										6	2	
JZD1—71/OA□										7	1	
JZD1—80/OA□										8	0	

注:1. 常开+常闭触头数等于8的是在中间继电器上加装了辅助触头组。

2. 直流线圈电压(V)等级有24、48、60、110和220五种。

表 21-68 3TB 系列接触器主要技术参数

产品型号		3TB40	3TB41	3TB42	3TB43	3TB44	3TB46	3TB47	3TB48	3TB50	3TB52	3TB54	3TB56	3TB58
对应 CJX1 系列型号		CJX1—9	CJX1—12	CJX1—16	CJX1—22	CJX1—32	CJX1—45	CJX1—63	CJX1—75	CJX1—110	CJX1—170			
额定绝缘电压/V		660					750	1000						
主触头数		3 常开												
主触头额定工作电流/A	AC—3	9	12	16	22	32	45	63	75	110	170	250	400	630
	AC—4	3.3	4.3	7.7	8.5	15.6	24	28	34	52	72	103	120	150
AC—3 时控制电动机功率/kW	220V	2.2	3	4	5.5	8.5	15	18.5	22	37	55	75	115	190
	380V	4	5.5	7.5	11	15	22	30	37	55	90	93	200	325
	660V	5.5	7.5	11			37	37	55	90	132	200	355	560
AC—4 时控制电动机功率/kW	220V	0.75	1.1	2	2.2	4.3	6.3	7.5	7.8	15.6	21	31	37.5	46
	380V	1.4	1.9	3.5	4	7.5	11	14	17	27	37	55	65	80
	660V	2.4	3.3	6	6.6	11	20	23	28.5	45	64	92	106	130

表 21-69 CJ20 系列接触器主要技术参数

产品型号		CJ20 —10	CJ20 —16	CJ20 —25	CJ20 —40	CJ20 —63	CJ20 —100	CJ20 —160	CJ20 —160 /11	CJ20 —250	CJ20 —250 /06	CJ20 —400	CJ20 —400 /06	CJ20 —630	CJ20 —630 /06	CJ20 —630 /11	
主触头数量		3															
额定绝缘电压/V		660							1140		660					1140	
最大工作电压/V		660							1140		660					1140	
额定发热电流/A		10	16	32	55	80	125	200		315		400		630	400		
AC—3 和 AC—4 额定工作 电流/A	380V	10	16	25	40	63	100	160		250		400		630			
	660V	5.2	13	14.5	25	40	63	100			200		250		400		
	1140V								80							400	
AC—3 时 额定控制 电动机 功率 /kW	220V	2.2	4.5	5.5	11	18	28	48		80		115		175			
	380V	2.2	7.5	11	22	30	50	85		132		200		300			
	660V	4	11	13	22	35	50	85			190		220		350		
	1140V								85							400	
AC—3 额 定负荷时 操作频率 /(次/h)	380V	1200							600								
	660V	600							300								
	1140V								300							120	
AC—4 额 定负荷时 操作频率 /(次/h)	380V	300							120								
	660V	120							30								
	1140V								30							30	

表 21-70 KTF4 系列感性负载调功器主要技术参数

产品型号	额定输出容量 /kVA	额定输入电压 /V	额定输出电流 /A	外形及安装尺寸/mm		
				A	H	B
KTF4—32/3 × 380	32	3 相 380	49	660	1300	500
KTF4—56/3 × 380	56		86		1500	
KTF4—63/3 × 380	63		97			
KTF4—80/3 × 380	80		123	700	1700	600
KTF4—125/3 × 380	125		193			
KTF4—160/3 × 380	160		246			
KTF4—320/3 × 380	320		493			

第 22 章 热处理的质量检验

22.1 热处理质量检验标准 (表 22-1)

表 22-1 热处理质量检验标准

序 号	标 准 编 号	标 准 名 称
1	JB/T 9204—1999	钢件感应加热淬火金相检验
2	JB/T 9205—1999	珠光体球墨铸铁零件感应加热淬火金相检验
3	JB/T 9206—1999	钢件热浸铝工艺及质量检验
4	JB/T 9211—1999	中碳钢与中碳合金结构钢马氏体等级
5	JB/T 8420—1996	热作模具用钢金相检验
6	JB/T 7709—1995	渗硼层显微组织、硬度及层深测定方法
7	JB/T 7710—1995	薄层碳氮共渗或薄层渗碳钢件显微组织检验
8	JB/T 7713—1995	高碳高合金钢制冷作模具显微组织检验
9	JB/T 6954—1993	灰铸铁件接触电阻淬火质量检验和评级
10	JB/T 6050—1992	钢铁热处理零件硬度检验通则
11	JB/T 6051—1992	球墨铸铁热处理工艺及质量检验
12	JB/T 5069—1991	钢铁零件渗金属层金相检验方法
13	JB/T 5074—1991	低、中碳钢球化体评级
14	GB/T 15749—1995	定量金相手工测定方法
15	GB/T 13321—1991	钢铁硬度锉刀检验方法
16	GB/T 11354—1989	钢铁零件渗氮层深度测定和金相组织检验
17	GB/T 9450—1988	钢件渗碳淬火有效硬化层深度的测定和校核
18	GB/T 9451—1988	钢件薄表面总硬化层深度或有效硬化层深度的测定
19	GB/T 5617—1985	钢的感应加热淬火或火焰淬火后有效硬化层深度的测定

22.2 硬度检验方法和换算

1. 布氏硬度 (表 22-2 ~ 表 22-5)

布氏硬度检测是通过加载将钢球压头 (GB/T 231.1—2002 中已取消了钢球压头, 硬度符号均为 HBW。考虑到工厂中大量应用钢球压头, 故本章仍采用 HBS。)(用于测试硬度 < 450HBS 的材料) 或硬质合金压头 (用于测试硬度 < 650HBW 的材料) 压入被测试的金属零件 (或试样) 的表面, 根据单位压痕面积上所受的负荷大小来确定硬度值 (HB):

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{P}{\pi Dt} \quad (22-1)$$

式中 F ——凹陷压痕的面积 (mm^2);

t ——压痕凹陷的深度 (mm);

HB——布氏硬度符号, 单位为 ($\times 10\text{MPa}$)。

由于压痕凹陷深度 t 较难测定, 为了检测方便, 通常将公式 19-1 中的 t 换成压痕直径 d , 即 HB 的计算公式为:

$$HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (22-2)$$

式中 D ——压头直径 (mm);

d ——压痕直径 (mm)。

检测布氏硬度时,检测面应是光滑平面,表面粗糙度一般为 $R_a \leq 0.8\mu\text{m}$,试件厚度至少应为压痕直径的 10 倍。试验时,压痕中心应距试样边缘 $\geq 4d$,当材料硬度 $< 35\text{HBS}$ 时为 $6d$;两个压痕 d_1 、 d_2 之差不应超过较小直径的 2%。

布氏硬度计的压头直径有 10mm、5mm、2.5mm、2mm 和 1mm 五种,在实际测量中,根据零件材料的软硬程度,也将采用的 F/D^2 值规定为 30、15、10、5、2.5、1.25、1 七种。按照国标 GB/T231—1984 中的规定,只有当满足 $d = (0.24 \sim 0.6) D$ 时,试验结果才有效。因此,测试布氏硬度的试件的最小厚度参见表 22-2。试验条件参见表 22-3,不同试验条件下试验所采用的载荷列于表 22-4。根据试验中测得的压痕直径 d 值,由表 22-5 中即可查得 HB 值。

表 22-2 布氏硬度检测试件的最小厚度 (单位: mm)

压痕直径 d/mm	压头直径 D/mm					压痕直径 d/mm	压头直径 D/mm				
	1	2	2.5	5	10		1	2	2.5	5	10
0.1	—	—	—	—	—	2.2	—	—	—	2.55	—
0.2	0.10	—	—	—	—	2.4	—	—	—	3.08	1.47
0.3	0.23	—	—	—	—	2.6	—	—	—	3.65	1.73
0.4	0.41	—	—	—	—	2.8	—	—	—	4.29	2.00
0.5	0.68	0.31	—	—	—	3.0	—	—	—	5.00	2.30
0.6	1.00	0.46	0.36	—	—	3.2	—	—	—	—	2.62
0.7	—	0.64	0.50	—	—	3.4	—	—	—	—	2.98
0.8	—	0.84	0.66	—	—	3.6	—	—	—	—	3.35
0.9	—	1.08	0.84	—	—	3.8	—	—	—	—	3.75
1.0	—	1.38	1.04	—	—	4.0	—	—	—	—	4.18
1.1	—	1.65	1.28	—	—	4.2	—	—	—	—	4.63
1.2	—	2.00	1.54	0.73	—	4.4	—	—	—	—	5.10
1.3	—	—	1.83	0.86	—	4.6	—	—	—	—	5.60
1.4	—	—	2.15	1.00	—	4.8	—	—	—	—	6.14
1.5	—	—	2.50	1.15	—	5.0	—	—	—	—	6.70
1.6	—	—	—	1.31	—	5.2	—	—	—	—	7.29
1.7	—	—	—	1.49	—	5.4	—	—	—	—	7.91
1.8	—	—	—	1.68	—	5.6	—	—	—	—	8.58
1.9	—	—	—	1.88	—	5.8	—	—	—	—	9.28
2.0	—	—	—	2.09	—	6.0	—	—	—	—	10.0

表 22-3 布氏硬度试验技术条件

	硬度范围 HBS	F/D^2	保荷时间/s	注
钢及铸铁	< 140 ≥ 140	10 30	材料	对铸铁在厚度允许时采用 $\phi 10\text{mm}$ 钢球,否则可采用 $\phi 2.5\text{mm}$ 或 $\phi 5\text{mm}$ 钢球
铜及铜合金	< 35 35 ~ 200 > 200	5 10 30	$> 35\text{HBS}$ 为 $30 \pm 2\text{s}$	
轻金属	< 35 35 ~ 80 > 80	5 10 15	$\leq 35\text{HBS}$ 为 $60 \pm 2\text{s}$	
铅、锡		1 1.25		

表 22-4 布氏硬度试验施加负荷的规定

硬度符号 HB	钢球直径 /mm	F/D^2	施加负荷 /kgf(N)	硬度符号 HB	钢球直径 /mm	F/D^2	施加负荷 /kgf(N)
10/3000	10	30	3000(29420)	5/62.5	5	2.5	62.5(612.9)
10/1500	10	15	1500(14710)	5/31.25	5	1.25	31.25(306.5)
10/1000	10	10	1000(9807)	5/25	5	1	25(245.2)
10/500	10	5	500(4903)	2.5/187.5	2.5	30	187.5(1839)
10/250	10	2.5	250(2452)	2.5/62.5	2.5	10	62.5(612.9)
10/125	10	1.25	125(1226)	2.5/31.25	2.5	5	31.25(306.5)
10/100	10	1	100(980.7)	2.5/15.625	2.5	2.5	15.625(153.2)
5/750	5	30	750(7355)	2.5/7.813	2.5	1.25	7.813(67.61)
5/250	5	10	250(2452)	2.5/6.25	2.5	1	6.25(61.29)
5/125	5	5	125(1226)				

表 22-5 金属布氏硬度(HB)数值表

压痕直径/mm	载荷 $F/\times 10\text{N}$						
$d_{10}, 2d_5, 4d_{2.5}, 5d_2, 10d_1$	$30D^2$	$15D^2$	$10D^2$	$5D^2$	$2.5D^2$	$1.25D^2$	$1D^2$
2.40	653	327	218	109	54.5	27.2	21.8
2.45	627	313	209	104	52.2	26.1	20.9
2.50	601	301	200	100	50.1	25.1	20.0
2.55	578	289	193	96.3	48.1	24.1	19.3
2.60	555	278	185	92.5	46.3	23.1	18.4
2.65	534	267	178	89.0	44.5	22.3	17.8
2.70	514	257	171	85.7	42.9	21.4	17.1
2.75	495	248	165	82.6	41.3	20.6	16.5
2.80	477	239	159	79.6	39.8	19.9	15.9
2.85	461	230	154	76.8	38.4	19.2	15.4
2.90	444	222	148	74.1	37.0	18.5	14.8
2.95	429	215	143	71.5	35.8	17.9	14.3
3.00	415	207	138	69.1	34.6	17.3	13.8
3.05	401	200	134	66.8	33.4	16.7	13.4
3.10	388	194	129	64.6	32.3	16.2	12.9
3.15	375	188	125	62.5	31.3	15.6	12.5
3.20	363	182	121	60.5	30.3	15.1	12.1
3.25	352	176	117	58.6	29.3	14.7	11.7
3.30	341	170	114	56.8	28.4	14.2	11.4
3.35	331	165	110	55.1	27.5	13.8	11.0
3.40	321	160	107	53.4	26.7	13.4	10.7
3.45	311	156	104	51.8	25.9	13.0	10.4
3.50	302	151	101	50.3	25.2	12.6	10.1
3.55	293	147	97.7	48.9	24.4	12.2	9.77
3.60	285	142	95.0	47.5	23.7	11.9	9.55
3.65	277	138	92.3	46.1	23.1	11.5	9.23
3.70	269	135	89.7	44.9	22.4	11.2	8.97
3.75	262	131	87.2	43.6	21.8	10.9	8.72
3.80	255	127	84.9	42.4	21.2	10.6	8.49
3.85	248	124	82.6	41.3	20.6	10.3	8.26

(续)

压痕直径/mm	载荷 $F/\times 10\text{N}$						
$d_{10}, 2d_5, 4d_{2.5}, 5d_2, 10d_1$	$30D^2$	$15D^2$	$10D^2$	$5D^2$	$2.5D^2$	$1.25D^2$	$1D^2$
3.90	241	121	80.4	40.2	20.1	10.0	8.04
3.95	235	117	78.3	39.1	19.6	9.79	7.83
4.00	229	114	76.3	38.1	19.1	9.53	7.63
4.05	223	111	74.3	37.1	18.6	9.29	7.43
4.10	217	109	72.4	36.2	18.1	9.05	7.24
4.15	212	106	70.6	35.3	17.6	8.82	7.06
4.20	207	103	68.8	34.4	17.2	8.61	6.88
4.25	201	101	67.1	33.6	16.8	8.39	6.71
4.30	197	98.3	65.5	32.8	16.4	8.19	6.55
4.35	192	95.9	63.6	32.0	16.0	7.99	6.39
4.40	187	93.6	62.4	31.2	15.6	7.80	6.24
4.45	183	91.4	60.9	30.5	15.2	7.62	6.09
4.50	170	89.3	59.5	29.8	14.9	7.44	5.95
4.55	174	87.2	58.1	28.1	14.5	7.27	5.81
4.60	170	85.2	56.8	28.4	14.2	7.10	5.68
4.65	167	83.3	55.5	27.8	13.9	6.94	5.55
4.70	163	81.4	54.3	27.1	13.6	6.78	5.43
4.75	159	79.6	53.0	26.5	13.3	6.63	5.30
4.80	156	77.8	51.9	25.9	13.0	6.48	5.19
4.85	152	76.1	50.7	25.4	12.7	6.34	5.07
4.90	149	74.4	49.6	24.8	12.4	6.20	4.96
4.95	146	72.8	48.6	24.3	12.1	6.07	4.86
5.00	143	71.3	47.5	23.8	11.9	5.94	4.75
5.05	140	69.8	46.5	23.3	11.6	5.81	4.65
5.10	137	68.3	45.5	22.8	11.4	5.69	4.55
5.15	134	66.9	44.6	22.3	11.1	5.57	4.46
5.20	131	65.5	43.7	21.8	10.9	5.46	4.37
5.25	128	64.1	42.8	21.4	10.7	5.34	4.28
5.30	126	62.8	41.9	20.9	10.5	5.24	4.19
5.35	123	61.5	41.0	20.5	10.3	5.13	4.10
5.40	121	60.3	40.2	20.1	10.1	5.03	4.02
5.45	118	59.1	39.4	19.7	9.85	4.93	3.94
5.50	116	57.9	38.6	19.3	9.66	4.83	3.86
5.55	114	56.8	37.9	18.9	9.47	4.73	3.79
5.60	111	55.7	37.1	18.6	9.28	4.64	3.71
5.65	109	54.6	36.4	18.2	9.10	4.55	3.64
5.70	107	53.5	35.7	17.8	8.92	4.46	3.57
5.75	105	52.5	35.0	17.5	8.75	4.38	3.50
5.80	103	51.5	34.3	17.2	8.59	4.29	3.43
5.85	101	50.5	33.7	16.8	8.42	4.21	3.37
5.90	99.2	49.6	33.1	16.5	8.26	4.13	3.31
5.95	97.3	48.7	32.4	16.2	8.11	4.05	3.24
6.00	95.5	47.7	31.8	15.9	7.96	3.98	3.18

注：1. 表中压痕直径为 $\phi 10\text{mm}$ 钢球试验数值，如用其他尺寸钢球试验时，压痕直径应增大相应倍数后在表中查出。

2. 表中未列出压痕直径的 HB，可根据上下两数值用内插法计算求得。

对于大型工件，可使用锤击式简易布氏硬度计检测工件的硬度。测试时首先估计被测工件大致的硬度值，选择与其硬度相近的标准杆插入硬度计内，然后用手锤敲击锤击杆顶端一次，同时可在工件表面和标准杆表面得到压痕，直径分别为 d 和 d' ，然后根据公式 22-3 计算出工件的硬度。

$$HB = HB' \left(\frac{D - \sqrt{D^2 - d'^2}}{D - \sqrt{D^2 - d^2}} \right)$$

(22-3)

式中 D ——钢球直径 (mm);
 d' ——标准杆表面压痕直径 (mm);
 d ——工件表面压痕直径 (mm);
 HB' ——标准杆硬度值;
 HB ——工件硬度值。

2. 洛氏硬度 (表 22-6 ~ 表 22-9)

表 22-6 洛氏硬度的试验条件和应用范围

硬度符号	压 头	预载荷 kgf (N)	主载荷 kgf (N)	总载荷 kgf (N)	测量范围	应用举例
HRA	金刚石圆锥	10 (98.1)	50 (490.3)	60 (588.4)	60 ~ 85	硬质合金、碳化物、表面 淬火钢、硬化薄钢板等
HRB	1/16"钢球	10 (98.1)	90 (882.6)	100 (980.7)	25 ~ 100	铜合金、退火钢、铝合金、 可锻铸铁等
HRC	金刚石圆锥	10 (98.1)	140 (1373)	150 (1471)	20 ~ 67	淬火钢、冷硬铸铁、珠光 体可锻铸铁、钛合金等

表 22-7 在圆柱体上测定 HRC 的数值修正表

HRC	圆柱形试件的直径/mm								
	6	10	13	16	19	22	25	32	38
20	6.0	4.5	3.5	2.5	2.0	1.5	1.5	1.0	1.0
25	5.5	4.0	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	1.0	1.0
30	5.0	3.5	2.5	2.0	1.5	1.5	1.0	1.0	0.5
35	4.0	3.0	2.0	1.5	1.5	1.0	1.0	0.5	0.5
40	3.5	2.5	2.0	1.5	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5
45	3.0	2.0	1.5	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5
50	2.5	2.0	1.5	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5
55	2.0	1.5	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0
60	1.5	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0
65	1.5	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0

注:表中范围内的其他直径和硬度值,可用插入法求得修正值。

表 22-8 在圆柱体上测定 HRB 的数值修正表

HRB	圆柱形试件的直径/mm						
	6	10	13	16	19	22	25
20	11.0	7.5	5.5	4.5	4.0	3.5	3.0
30	10.0	6.5	5.0	4.5	3.5	3.0	2.5
40	9.0	6.0	4.5	4.0	3.0	2.5	2.5
50	8.0	5.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0
60	7.0	5.0	3.5	3.0	2.5	2.0	2.0
70	6.0	4.0	3.0	2.5	2.0	2.0	1.5
80	5.0	3.5	2.5	2.0	1.5	1.5	1.5
90	4.0	3.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.0
100	3.5	2.5	1.5	1.5	1.0	1.0	0.5

注:表中范围内的其它直径和硬度值,可用插入法求得修正值。

表 22-9 在球面上测定 HRC 的数值修正表

HRC	球 面 直 径/mm								
	4	6.5	8	9.5	11	12.5	15	20	25
55	6.4	3.9	3.2	2.7	2.3	2.0	1.7	1.3	1.0
60	5.8	3.6	2.9	2.4	2.1	1.8	1.5	1.2	0.9
65	5.2	3.2	2.6	2.2	1.9	1.7	1.4	1.0	0.8

注:表中范围内的其他直径和硬度值,可用插入法求得修正值。

3. 维氏硬度 (表 22-10 ~ 表 22-17)

表 22-10 维氏硬度标记方法

硬度符号	施加载荷/N	硬度符号	施加载荷/N
HV5	49.03	HV30	294.2
HV10	98.07	HV50	490.3
HV20	196.1	HV100	980.7

表 22-11 压痕对角线长度 d 与维氏硬度值对照表(载荷 98N)

压痕对角线/mm	0.000	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
0.10	1854	1818	1783	1748	1714	1682	1650	1620	1590	1561
0.11	1533	1505	1478	1452	1427	1402	1378	1354	1332	1310
0.12	1288	1267	1246	1226	1206	1187	1168	1150	1132	1114
0.13	1097	1080	1064	1048	1033	1018	1003	988	974	960
0.14	946	933	920	907	894	882	870	858	847	835
0.15	824	813	803	792	782	772	762	752	743	734
0.16	724	715	700	698	690	681	673	665	657	649
0.17	642	634	627	620	613	606	599	592	585	579
0.18	572	566	560	554	548	542	536	530	525	519
0.19	514	508	503	498	493	488	483	478	473	468
0.20	464	459	455	450	446	442	437	433	429	425
0.21	421	417	413	409	405	401	397	394	390	387
0.22	383	380	376	373	370	366	363	360	357	354

(续)

压痕对角线/mm	0.000	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
0.23	351	348	345	342	339	336	333	330	327	325
0.24	322	319	317	314	312	309	306	304	302	299
0.25	297	294	292	289	287	285	283	281	279	276
0.26	274	272	270	268	266	264	262	260	258	256
0.27	254	253	251	249	247	245	243	242	240	238
0.28	236	235	233	232	230	228	227	225	224	222
0.29	221	219	218	216	215	213	212	210	209	207
0.30	206	205	203	202	201	199	198	197	196	194
0.31	193	192	191	189	188	187	186	185	183	182
0.32	181	180	179	178	177	176	175	173	172	171
0.33	170	169	168	167	166	165	164	163	162	161
0.34	160	160	159	158	157	156	155	154	153	152
0.35	151.4	150.5	149.7	148.8	148.0	147.1	146.3	145.5	144.7	143.9
0.36	143.1	142.3	141.5	140.7	140.0	139.2	138.4	137.7	136.9	136.2
0.37	135.5	134.7	134.0	133.3	132.6	131.9	131.2	130.5	129.8	129.1
0.38	128.4	127.7	127.1	126.4	125.8	125.1	124.5	123.8	123.2	122.6
0.39	121.9	121.3	120.7	120.1	119.5	118.9	118.3	117.7	117.1	116.5
0.40	115.9	115.3	114.8	114.2	113.6	113.1	112.5	111.9	111.4	110.9
0.41	110.3	109.8	109.3	108.7	108.2	107.7	107.2	106.6	106.1	105.6
0.42	105.1	104.5	104.1	103.6	103.1	102.7	102.2	101.7	101.2	100.8
0.43	100.3	99.8	99.4	98.9	98.5	98.0	97.6	97.1	96.7	96.2
0.44	95.8	95.3	94.9	94.5	94.1	93.6	93.2	92.8	92.4	92.0
0.45	91.6	91.2	90.8	90.4	90.0	89.6	89.2	88.8	88.4	88.0
0.46	87.6	87.3	86.9	86.5	86.1	85.8	85.4	85.0	84.7	84.3
0.47	84.0	83.6	83.2	82.9	82.5	82.2	81.8	81.5	81.2	80.8
0.48	80.5	80.2	79.8	79.5	79.2	78.8	78.5	78.2	77.9	77.6
0.49	77.2	76.9	76.6	76.3	76.0	75.7	75.4	75.1	74.8	74.5
0.50	74.2	73.9	73.6	73.3	73.0	72.7	72.4	72.1	71.9	71.6
0.51	71.3	71.0	70.7	70.5	70.2	69.9	69.9	69.4	69.1	68.8
0.52	68.6	68.3	68.1	67.8	67.5	67.3	67.0	66.8	66.5	66.3
0.53	66.0	65.8	65.5	65.3	65.0	64.8	64.5	64.3	64.1	63.8
0.54	63.6	63.4	63.1	62.9	62.7	62.4	62.2	62.0	61.7	61.5
0.55	61.3	61.1	60.9	60.6	60.4	60.2	60.0	59.8	59.6	59.3
0.56	59.1	58.9	58.7	58.5	58.3	58.1	57.9	57.7	57.5	57.3
0.57	57.1	56.9	56.7	56.5	56.3	56.1	55.9	55.7	55.5	55.3
0.58	55.1	54.9	54.7	54.6	54.4	54.2	54.0	53.8	53.6	53.4
0.59	53.3	53.1	52.9	52.7	52.6	52.4	52.2	52.0	51.9	51.7
0.60	51.5	51.3	51.2	51.0	50.8	50.7	50.5	50.3	50.2	50.0
0.61	49.8	49.7	49.5	49.4	49.2	49.0	48.9	48.7	48.6	48.4
0.62	48.2	48.1	47.9	47.8	47.6	47.5	47.3	47.2	47.0	46.9
0.63	46.7	46.6	46.4	46.3	46.1	46.0	45.8	45.7	45.6	45.4
0.64	45.3	45.1	45.0	44.8	44.7	44.6	44.4	44.3	44.2	44.0

(续)

压痕对角线/mm	0.000	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
0.65	43.9	43.8	43.6	43.5	43.4	43.2	43.1	43.0	42.8	42.7
0.66	42.6	42.4	42.3	42.2	42.1	41.9	41.8	41.7	41.6	41.4
0.67	41.3	41.2	41.1	40.9	40.8	40.7	40.6	40.5	40.3	40.2
0.68	40.1	40.0	39.9	39.8	39.6	39.5	39.4	39.3	39.2	39.1
0.69	39.0	38.8	38.7	38.6	38.5	38.4	38.3	38.2	38.1	38.0
0.70	37.8	37.7	37.6	37.5	37.4	37.3	37.2	37.1	37.0	36.9
0.71	36.8	36.7	36.6	36.5	36.4	36.3	36.2	36.1	36.0	35.9
0.72	35.8	35.7	35.6	35.5	35.4	35.3	35.2	35.1	35.0	34.9
0.73	34.8	34.7	34.6	34.5	34.4	34.3	34.2	34.1	34.0	34.0
0.74	33.9	33.8	33.7	33.6	33.5	33.4	33.3	33.2	33.1	33.1
0.75	33.0	32.9	32.8	32.7	32.6	32.5	32.4	32.4	32.3	32.2
0.76	32.1	32.0	31.9	31.8	31.8	31.7	31.6	31.5	31.4	31.4
0.77	31.3	31.2	31.1	31.0	30.9	30.9	30.8	30.7	30.7	30.6
0.78	30.5	30.4	30.3	30.3	30.2	30.1	30.0	29.9	29.9	29.8
0.79	29.7	29.6	29.6	29.5	29.4	29.3	29.3	29.2	29.1	29.1
0.80	29.0	28.9	28.8	28.8	28.7	28.7	28.6	28.5	28.4	28.3
0.81	28.3	28.2	28.1	28.0	28.0	27.9	27.8	27.8	27.7	27.7
0.82	27.6	27.5	27.4	27.4	27.3	27.3	27.2	27.1	27.0	27.0
0.83	26.9	26.8	26.8	26.7	26.7	26.6	26.5	26.5	26.4	26.3
0.84	26.3	26.2	26.2	26.1	26.0	26.0	25.9	25.8	25.8	25.7
0.85	25.7	25.6	25.6	25.5	25.4	25.4	25.3	25.3	25.2	25.1
0.86	25.1	25.0	25.0	24.9	24.8	24.8	24.7	24.7	24.6	24.6
0.87	24.5	24.4	24.4	24.3	24.3	24.2	24.2	24.1	24.1	24.0
0.88	24.0	23.9	23.8	23.8	23.7	23.7	23.6	23.6	23.5	23.5
0.89	23.4	23.4	23.3	23.3	23.2	23.2	23.1	23.0	23.0	22.9
0.90	22.9	22.8	22.8	22.7	22.7	22.6	22.6	22.5	22.5	22.4
0.91	22.4	22.3	22.3	22.3	22.2	22.2	22.1	22.1	22.0	22.0
0.92	21.9	21.9	21.8	21.8	21.7	21.7	21.6	21.6	21.5	21.5
0.93	21.4	21.4	21.4	21.3	21.3	21.2	21.2	21.1	21.1	21.0
0.94	21.0	20.9	20.9	20.8	20.8	20.8	20.7	20.7	20.6	20.6
0.95	20.5	20.5	20.5	20.4	20.4	20.3	20.3	20.2	20.2	20.2
0.96	20.1	20.1	20.0	20.0	19.96	19.91	19.87	19.83	19.79	19.75
0.97	19.71	19.67	19.63	19.59	19.55	19.51	19.47	19.43	19.39	19.35
0.98	19.31	19.27	19.23	19.19	19.15	19.11	19.07	19.04	19.00	18.96
0.99	18.92	18.88	18.84	18.81	18.77	18.73	18.69	18.66	18.62	18.58
1.00	18.54	18.51	18.47	18.43	18.39	18.36	18.32	18.29	18.25	18.21
1.01	18.18	18.14	18.11	18.07	18.04	18.00	17.96	17.93	17.89	17.85
1.02	17.83	17.79	17.76	17.72	17.69	17.65	17.62	17.58	17.55	17.51
1.03	17.48	17.45	17.41	17.38	17.34	17.31	17.28	17.24	17.21	17.17
1.04	17.14	17.11	17.08	17.05	17.01	16.98	16.95	16.92	16.88	16.85
1.05	16.82	16.79	16.76	16.72	16.69	16.66	16.63	16.59	16.56	16.53
1.06	16.50	16.47	16.44	16.41	16.38	16.35	16.32	16.29	16.26	16.23

(续)

压痕对角线/mm	0.000	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
1.07	16.20	16.17	16.14	16.11	16.08	16.05	16.02	15.99	15.96	15.93
1.08	15.90	15.87	15.84	15.81	15.78	15.75	15.72	15.69	15.67	15.64
1.09	15.61	15.58	15.55	15.52	15.49	15.47	15.44	15.41	15.38	15.35
1.10	15.33	15.30	15.27	15.24	15.22	15.19	15.16	15.13	15.11	15.08
1.11	15.05	15.02	14.99	14.97	14.94	14.92	14.89	14.86	14.84	14.81
1.12	14.78	14.76	14.73	14.70	14.68	14.65	14.63	14.60	14.57	14.55
1.13	14.52	14.49	14.47	14.45	14.42	14.39	14.37	14.35	14.32	14.29
1.14	14.27	14.24	14.22	14.19	14.17	14.14	14.12	14.09	14.07	14.05
1.15	14.02	13.99	13.97	13.95	13.93	13.90	13.88	13.85	13.83	13.81
1.16	13.78	13.76	13.73	13.71	13.69	13.66	13.64	13.62	13.59	13.57
1.17	13.54	13.52	13.50	13.48	13.45	13.43	13.41	13.39	13.38	13.34
1.18	13.32	13.29	13.27	13.25	13.23	13.21	13.19	13.16	13.14	13.12
1.19	13.10	13.07	13.05	13.03	13.01	12.99	12.96	12.94	12.92	12.90
1.20	12.88	12.86	12.84	12.81	12.79	12.77	12.75	12.73	12.71	12.69
1.21	12.67	12.64	12.62	12.60	12.58	12.56	12.54	12.52	12.50	12.48
1.22	12.46	12.44	12.42	12.40	12.38	12.36	12.34	12.32	12.30	12.28
1.23	12.26	12.24	12.22	12.19	12.18	12.16	12.14	12.12	12.10	12.08
1.24	12.06	12.04	12.02	12.00	11.98	11.96	11.94	11.92	11.91	11.89
1.25	11.87	11.85	11.83	11.81	11.79	11.77	11.75	11.73	11.71	11.69
1.26	11.68	11.66	11.64	11.62	11.61	11.59	11.57	11.55	11.54	11.52
1.27	11.50	11.48	11.46	11.44	11.42	11.40	11.39	11.37	11.35	11.33
1.28	11.32	11.30	11.28	11.26	11.25	11.23	11.21	11.19	11.18	11.16
1.29	11.14	11.12	11.11	11.09	11.07	22.06	11.04	11.02	11.01	10.99
1.30	10.97	10.95	10.94	10.92	10.91	10.89	10.87	10.85	10.84	10.82
1.31	10.80	10.79	10.77	10.75	10.74	10.72	10.70	10.68	10.66	10.65
1.32	10.64	10.62	10.61	10.59	10.58	10.56	10.55	10.53	10.51	10.49
1.33	10.48	10.46	10.45	10.44	10.42	10.40	10.39	10.37	10.36	10.34
1.34	10.33	10.31	10.29	10.28	10.27	10.25	10.24	10.22	10.21	10.19
1.35	10.18	10.16	10.15	10.13	10.12	10.10	10.09	10.07	10.06	10.04
1.36	10.03	10.01	10.00	9.98	9.97	9.95	9.94	9.92	9.91	9.89
1.37	9.88	9.87	9.85	9.84	9.82	9.81	9.79	9.78	9.77	9.75
1.38	9.74	9.72	9.71	9.70	9.68	9.67	9.65	9.64	9.63	9.61
1.39	9.60	9.58	9.57	9.56	9.54	9.53	9.52	9.50	9.49	9.47
1.40	9.46	9.45	9.43	9.42	9.41	9.39	9.38	9.37	9.35	9.34
1.41	9.33	9.31	9.30	9.29	9.27	9.26	9.25	9.24	9.22	9.21
1.42	9.20	9.18	9.17	9.16	9.15	9.13	9.12	9.11	9.09	9.08
1.43	9.07	9.05	9.04	9.03	9.02	9.01	8.89	8.98	8.97	8.96
1.44	8.94	8.93	8.92	8.91	8.89	8.88	8.87	8.86	8.84	8.83
1.45	8.82	8.81	8.80	8.78	8.77	8.76	8.75	8.74	8.72	8.71
1.46	8.70	8.69	8.68	8.66	8.65	8.64	8.63	8.62	8.60	8.59
1.47	8.58	8.57	8.56	8.55	8.54	8.52	8.51	8.50	8.49	8.48
1.48	8.47	8.45	8.44	8.43	8.42	8.41	8.40	8.39	8.38	8.36
1.49	8.35	8.34	8.33	8.32	8.31	8.30	8.29	8.27	8.26	8.25

(续)

压痕对角线/mm	0.000	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
1.50	8.24	8.23	8.22	8.21	8.20	8.19	8.18	8.17	8.15	8.14
1.51	8.13	8.12	8.11	8.10	8.09	8.08	8.07	8.06	8.05	8.04
1.52	8.03	8.02	8.01	7.99	7.98	7.97	7.96	7.95	7.94	7.93
1.53	7.92	7.91	7.90	7.89	7.88	7.87	7.86	7.85	7.84	7.83
1.54	7.82	7.81	7.80	7.79	7.78	7.77	7.76	7.75	7.74	7.73
1.55	7.72	7.71	7.70	7.69	7.68	7.67	7.66	7.65	7.64	7.63
1.56	7.62	7.61	7.60	7.59	7.58	7.57	7.56	7.55	7.54	7.53
1.57	7.52	7.51	7.50	7.49	7.485	7.475	7.466	7.456	7.447	7.438
1.58	7.428	7.419	7.409	7.400	7.391	7.381	7.372	7.363	7.354	7.344
1.59	7.335	7.326	7.317	7.307	7.298	7.289	7.280	7.271	7.262	7.253
1.60	7.244	7.235	7.226	7.217	7.208	7.199	7.190	7.181	7.172	7.163
1.61	7.154	7.145	7.136	7.127	7.119	7.110	7.101	7.092	7.083	7.075
1.62	7.066	7.057	7.048	7.040	7.031	7.022	7.014	7.005	6.997	6.988
1.63	6.979	6.971	6.962	6.954	6.945	6.937	6.928	6.920	6.911	6.903
1.64	6.895	6.886	6.878	6.869	6.861	6.853	6.844	6.836	6.828	6.820
1.65	6.811	6.803	6.795	6.787	6.778	6.770	6.762	6.754	6.746	6.738
1.66	6.729	6.721	6.713	6.705	6.697	6.689	6.681	6.673	6.665	6.657
1.67	6.649	6.641	6.633	6.625	6.617	6.609	6.602	6.594	6.586	6.578
1.68	6.570	6.562	6.555	6.547	6.539	6.531	6.524	6.516	6.508	6.500
1.69	6.493	6.485	6.477	6.470	6.462	6.545	6.447	6.439	6.432	6.424
1.70	6.416	6.409	6.401	6.394	6.386	6.379	6.371	6.364	6.357	6.349
1.71	6.342	6.334	6.327	6.319	6.312	6.305	6.297	6.290	6.283	6.275
1.72	6.268	6.261	6.254	6.246	6.239	6.232	6.225	6.217	6.210	6.203
1.73	6.196	6.189	6.182	6.174	6.167	6.160	6.153	6.146	6.139	6.132
1.74	6.125	6.118	6.111	6.104	6.097	6.090	6.083	6.076	6.069	6.062
1.75	6.055	6.048	6.041	6.034	6.027	6.021	6.014	6.007	6.000	5.993
1.76	5.986	5.979	5.973	5.966	5.959	5.953	5.946	5.939	5.932	5.926
1.77	5.919	5.912	5.906	5.899	5.892	5.886	5.879	5.872	5.866	5.859
1.78	5.853	5.846	5.840	5.833	5.826	5.820	5.813	5.807	5.800	5.794
1.79	5.787	5.781	5.775	5.768	5.762	5.755	5.749	5.742	5.736	5.730
1.80	5.723	5.717	5.711	5.704	5.698	5.692	5.685	5.679	5.673	5.667
1.81	5.660	5.654	5.648	5.642	5.635	5.629	5.623	5.617	5.611	5.604
1.82	5.598	5.592	5.586	5.580	5.574	5.568	5.562	5.555	5.549	5.543
1.83	5.537	5.531	5.525	5.519	5.513	5.507	5.501	5.495	5.489	5.483
1.84	5.477	5.471	5.465	5.459	5.453	5.448	5.442	5.436	5.430	5.424
1.85	5.418	5.412	5.406	5.401	5.395	5.389	5.383	5.377	5.372	5.366
1.86	5.360	5.354	5.349	5.343	5.337	5.331	5.326	5.320	5.314	5.309
1.87	5.303	5.297	5.292	5.286	5.280	5.275	5.269	5.263	5.258	5.252
1.88	5.247	5.241	5.235	5.230	5.224	5.219	5.213	5.208	5.202	5.197
1.89	5.191	5.186	5.180	5.175	5.169	5.164	5.158	5.153	5.148	5.142
1.90	5.137	5.131	5.126	5.121	5.115	5.110	5.104	5.099	5.094	5.088
1.91	5.083	5.078	5.072	5.067	5.062	5.057	5.051	5.046	5.041	5.036

(续)

压痕对角线/mm	0.000	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
1.92	5.030	5.025	5.020	5.015	5.009	5.004	4.999	4.994	4.989	4.983
1.93	4.978	4.973	4.968	4.963	4.958	4.953	4.947	4.942	4.937	4.932
1.94	4.927	4.922	4.917	4.912	4.907	4.902	4.897	4.892	4.887	4.882
1.95	4.877	4.872	4.867	4.862	4.857	4.852	4.847	4.842	4.837	4.832
1.96	4.827	2.822	4.817	4.812	4.807	4.803	4.798	4.793	4.788	4.783
1.97	4.778	4.773	4.769	4.764	4.759	4.754	4.749	4.744	4.740	4.735
1.98	4.730	4.725	4.721	4.716	4.711	4.706	4.702	4.697	4.692	4.687
1.99	4.683	4.678	4.673	4.669	4.664	4.659	4.655	4.650	4.645	4.641

注：表中范围以外的压痕对角线长度，可先将压痕对角线长度数值的小数点移动，变成表中所有的数值，查得硬度值后再将小数点向相反方向移动。如压痕对角线长度的小数点向右移动一位，则硬度值的小数点应向相左移动二位，反之亦然。

表 22-12 球面(凸形)维氏硬度修正系数

d/D	修正系数	d/D	修正系数	d/D	修正系数
0.004	0.995	0.055	0.945	0.122	0.895
0.009	0.990	0.061	0.940	0.130	0.890
0.013	0.985	0.067	0.935	0.139	0.885
0.016	0.980	0.073	0.930	0.147	0.880
0.023	0.975	0.079	0.925	0.156	0.875
0.028	0.970	0.086	0.920	0.165	0.870
0.033	0.965	0.093	0.915	0.175	0.865
0.038	0.960	0.100	0.910	0.185	0.860
0.043	0.955	0.107	0.905	0.195	0.855
0.049	0.950	0.114	0.900	0.206	0.850

表 22-13 球面(凹形)维氏硬度修正系数

d/D	修正系数	d/D	修正系数	d/D	修正系数
0.004	1.005	0.041	1.055	0.071	1.105
0.008	1.010	0.045	1.060	0.074	1.110
0.012	1.015	0.048	1.065	0.077	1.115
0.016	1.020	0.051	1.070	0.079	1.120
0.020	1.025	0.054	1.075	0.082	1.125
0.024	1.030	0.057	1.080	0.084	1.130
0.028	1.035	0.060	1.085	0.087	1.135
0.031	1.040	0.063	1.090	0.089	1.140
0.035	1.045	0.066	1.095	0.091	1.145
0.038	1.050	0.069	1.100	0.094	1.150

表 22-14 圆柱面(凸形)维氏硬度修正系数(对角线与轴成 45°)

d/D	修正系数	d/D	修正系数	d/D	修正系数
0.009	0.995	0.071	0.960	0.139	0.925
0.017	0.990	0.081	0.955	0.149	0.920
0.026	0.985	0.090	0.950	0.159	0.915
0.035	0.980	0.100	0.945	0.169	0.910
0.044	0.975	0.109	0.940	0.179	0.905
0.053	0.970	0.119	0.935	0.189	0.900
0.062	0.965	0.129	0.930	0.200	0.895

表 22-15 圆柱面(凹形)维氏硬度修正系数(对角线与轴成 45°)

d/D	修正系数	d/D	修正系数	d/D	修正系数
0.009	1.005	0.089	1.055	0.162	1.105
0.017	1.010	0.097	1.060	0.169	1.110
0.025	1.015	0.104	1.065	0.176	1.115
0.034	1.020	0.112	1.070	0.183	1.120
0.042	1.025	0.119	1.075	0.189	1.125
0.050	1.030	0.127	1.080	0.196	1.130
0.058	1.035	0.134	1.085	0.203	1.135
0.066	1.040	0.141	1.090	0.209	1.140
0.074	1.045	0.148	1.095	0.216	1.145
0.082	1.050	0.155	1.100	0.222	1.150

表 22-16 圆柱面(凸形)维氏硬度修正系数(对角线平行于轴)

d/D	修正系数	d/D	修正系数	d/D	修正系数
0.009	0.995	0.054	0.975	0.126	0.955
0.019	0.990	0.068	0.970	0.153	0.950
0.029	0.985	0.085	0.965	0.189	0.945
0.041	0.980	0.104	0.960	0.243	0.940

表 22-17 圆柱面(凹形)维氏硬度修正系数(对角线平行于轴)

d/D	修正系数	d/D	修正系数	d/D	修正系数
0.008	1.005	0.067	1.055	0.103	1.105
0.016	1.010	0.071	1.060	0.105	1.110
0.023	1.015	0.076	1.065	0.108	1.115
0.030	1.020	0.079	1.070	0.111	1.120
0.036	1.025	0.083	1.075	0.113	1.125
0.042	1.030	0.087	1.080	0.116	1.130
0.048	1.035	0.090	1.085	0.119	1.135
0.053	1.040	0.093	1.090	0.120	1.140
0.058	1.045	0.097	1.095	0.123	1.145
0.063	1.050	0.100	1.100	0.125	1.150

4. 小负荷维氏硬度(表 22-18)

小负荷维氏硬度测试时的施加载荷在 1.961 ~ 29.43N, 常用来测定表面淬火层的硬化深度和化学热处理零件表面硬度以及小件和薄件的硬度。硬度的表示方法列于表 22-18。测试结果同样可根据压痕对角线长度由表 22-11 中查得。方法是用 1.961N、2.942N、4.903N、9.807N、19.61N、24.52N 或 29.42N 载荷测得的压痕对角线长度在表 22-11 中查得硬度值, 分别乘以 0.02、0.033、0.05、0.1、0.2、0.25 或 0.333 即可。

表 22-18 小负荷维氏硬度标记方法

硬度符号	施加载荷/N	硬度符号	施加载荷/N
HV0.2	1.961	HV1	9.807
HV0.3	2.942	HV2	19.61
HV0.5	4.903	HV2.5	24.52
		HV3	29.42

5. 显微硬度(表 22-19)

显微硬度施加载荷的单位不是牛顿(N)而是克(g), 常用的载荷和硬度标记方法如表 22-19, 显微硬度的数值可根据所测得的压痕对角线长度由表 22-11 查得。

表 22-19 显微硬度标记方法

硬度符号	施加载荷/g	硬度符号	施加载荷/g
HV0.01	10	HV0.1	100
HV0.02	20	HV0.2	200
HV0.05	50	HV0.5	500

6. 肖氏硬度(表 22-20)

表 22-20 肖氏硬度与洛氏硬度换算表

HRC	HS	HRC	HS	HRC	HS	HRC	HS
68.0	97	56.0	75	35.5	48	96.4	33
67.5	96	54.7	73	34.3	47	94.6	32
67.0	95	53.5	71	33.1	46	93.8	31
66.4	93	52.1	70	32.1	45	92.8	30
65.9	92	51.0	68	30.9	43	91.9	29
65.3	91	49.6	66	28.8	41	90.0	28
64.7	90	48.5	65	27.6	40	89.0	27
64.0	88	47.1	63	26.6	39	86.8	26
63.3	87	45.7	61	25.4	38	85.0	25
62.5	86	44.5	59	24.2	37	80.8	23
61.7	84	43.1	58	22.8	36	78.7	22
61.0	83	41.8	56	21.7	35	76.4	21
60.0	81	40.4	54	20.5	34	72.0	20
59.2	80	39.1	52			69.8	19
58.7	79	37.9	51			67.6	18
57.3	77	36.6	50			65.7	15

注:表中数值摘自 ASTM 标准,所列洛氏硬度基准和我国采用的略有差别,使用时应予以注意。

7. 理氏硬度(表 22-21)

表 22-21 HL-D 型理氏硬度计的测量范围

测量范围	HL(D 型)	相当的静载硬度	测量范围	HL(D 型)	相当的静载硬度
钢	300 ~ 800	80 ~ 650HB	铸铁	360 ~ 660	90 ~ 380HB
	300 ~ 890	80 ~ 940HV	黄铜	200 ~ 550	40 ~ 170HB
	510 ~ 890	20 ~ 68HRC	铜合金	200 ~ 690	45 ~ 315HB
铝铸件	200 ~ 560	30 ~ 160HB			

8. 硬度与强度换算(表 22-22、表 22-23)

表 22-22 钢铁硬度及强度换算表(一)

[illegible]

(续)

硬 度								抗 拉 强 度 /MPa									
洛 氏		表面洛氏			维氏	布 氏		碳钢	铬钢	铬钒钢	铬镍钢	铬钼钢	铬镍钼钢	铬锰硅钢	超高强度钢	不锈钢	不分钢种
HRC	HRA	15-N	30-N	45-N	HV	HB 30D ²	d/mm 10/3000										
65.0	83.9	92.2	81.3	71.7	856												
64.5	83.6	92.1	81.0	71.2	840												
64.0	83.3	91.9	80.6	70.6	825												
63.5	83.1	91.8	80.2	70.1	810												
63.0	82.8	91.7	79.8	69.5	795												
62.5	82.5	91.5	79.4	69.0	780												
62.0	82.2	91.4	79.0	68.4	766												
61.5	82.0	91.2	78.6	67.9	752												
61.0	81.7	91.0	78.1	67.3	739												
60.5	81.4	90.8	77.7	66.8	726												
60.0	81.2	90.6	77.3	66.2	713										2691		2607
59.5	80.9	90.4	76.9	65.6	700										2623		2551
59.0	80.6	90.2	76.5	65.1	688										2558		2496
58.5	80.3	90.0	76.1	64.5	676										2496		2443
58.0	80.1	89.8	75.6	63.9	664										2437		2391
57.5	79.8	89.6	75.2	63.4	653										2380		2341
57.0	79.5	89.4	74.8	62.8	642										2326		2293
56.5	79.3	89.1	74.4	62.2	631										2274		2246
56.0	79.0	88.9	73.9	61.7	620										2224		2201
55.5	78.7	88.6	73.5	61.1	609										2177		2157
55.0	78.5	88.4	73.1	60.5	599					2066	2098			2086	2131		2115
54.5	78.2	88.1	72.6	59.9	589					2033	2061			2048	2087		2074
54.0	77.9	87.9	72.2	59.4	579					2000	2025			2010	2045		2034
53.5	77.7	87.6	71.8	58.8	570					1968	1990			1974	2005		1995
53.0	77.4	87.4	71.3	58.2	561					1937	1955	1925	1985	1938	1967		1957
52.5	77.1	87.1	70.9	57.6	551					1906	1920	1893	1951	1903	1930		1921
52.0	76.9	86.8	70.4	57.1	543				1881	1875	1887	1861	1918	1870	1894		1885
51.5	76.6	86.6	70.0	56.5	534				1841	1845	1854	1830	1886	1836	1860		1851
51.0	76.3	86.3	69.5	55.9	525	501	2.73		1803	1816	1821	1799	1854	1804	1827		1817
50.5	76.1	86.0	69.1	55.3	517	494	2.75		1767	1787	1790	1769	1823	1773	1795		1785
50.0	75.8	85.7	68.6	54.7	509	488	2.77	1744	1731	1758	1758	1739	1793	1742	1765	1759	1753
49.5	75.5	85.5	68.2	54.2	501	481	2.79	1714	1698	1730	1728	1710	1762	1712	1735	1723	1722
49.0	75.3	85.2	67.7	53.6	493	474	2.81	1686	1666	1702	1698	1682	1733	1683	1707	1688	1692
48.5	75.0	84.9	67.3	53.0	485	468	2.83	1658	1635	1675	1669	1654	1704	1654	1679	1655	1663
48.0	74.7	84.6	66.8	52.4	478	461	2.85	1631	1605	1649	1640	1626	1676	1627	1652	1623	1635
47.5	74.5	84.3	66.4	51.8	470	455	2.87	1606	1576	1623	1612	1599	1648	1600	1625	1592	1608
47.0	74.2	84.0	65.9	51.2	463	449	2.89	1581	1549	1597	1584	1573	1620	1573	1600	1563	1581
46.5	73.9	83.7	65.5	50.7	456	442	2.91	1556	1522	1572	1557	1547	1593	1547	1575	1535	1555
46.0	73.7	83.5	65.0	50.1	449	436	2.93	1533	1497	1547	1531	1522	1567	1522	1550	1508	1529
45.5	73.4	83.2	64.6	49.5	443	430	2.95	1510	1472	1522	1505	1497	1541	1498	1526	1482	1504

(续)

硬 度								抗 拉 强 度 /MPa									
洛 氏		表面洛氏			维氏	布 氏		碳钢	铬钢	铬钒钢	铬镍钢	铬钼钢	铬镍钼钢	铬锰硅钢	超高强度钢	不锈钢	不分钢种
HRC	HRA	15-N	30-N	45-N	HV	HR 30D ²	d/mm 10/3000										
45.0	73.2	82.9	64.1	48.9	436	424	2.97	1488	1448	1498	1480	1472	1516	1474	1502	1457	1480
44.5	72.9	82.6	63.6	48.3	429	418	2.99	1466	1426	1475	1455	1448	1491	1450	1478	1433	1457
44.0	72.6	82.3	63.2	47.7	423	413	3.01	1445	1403	1452	1431	1425	1467	1427	1455	1410	1434
43.5	72.4	82.0	62.7	47.1	417	407	3.03	1425	1382	1429	1408	1402	1443	1405	1432	1387	1411
43.0	72.1	81.7	62.3	46.5	411	401	3.05	1405	1361	1407	1385	1379	1420	1384	1409	1366	1389
42.5	71.8	81.4	61.8	45.9	405	396	3.07	1386	1341	1385	1362	1357	1397	1362	1385	1345	1368
42.0	71.6	81.1	61.3	45.4	399	391	3.09	1367	1322	1364	1340	1336	1375	1342	1362	1325	1347
41.5	71.3	80.8	60.9	44.8	393	385	3.11	1348	1303	1343	1319	1315	1353	1322	1339	1305	1327
41.0	71.1	80.5	60.4	44.2	388	380	3.13	1331	1284	1322	1298	1294	1331	1302	1315	1286	1307
40.5	70.8	80.2	60.0	43.6	382	375	3.15	1313	1267	1302	1277	1274	1310	1283	1291	1268	1287
40.0	70.5	79.9	59.5	43.0	377	370	3.17	1296	1249	1282	1257	1254	1290	1264	1267	1250	1268
39.5	70.3	79.6	59.0	42.4	372	365	3.19	1279	1232	1262	1238	1235	1270	1246	1243	1233	1250
39.0	70.0	79.3	58.6	41.8	367	360	3.21	1263	1216	1243	1219	1216	1250	1228	1218	1216	1232
38.5		79.0	58.1	41.2	362	355	3.24	1246	1199	1225	1200	1197	1231	1211	1193	1200	1214
38.0		78.7	57.6	40.6	357	350	3.26	1231	1184	1206	1182	1179	1212	1194		1184	1197
37.5		78.4	57.2	40.0	352	345	3.28	1215	1168	1188	1165	1162	1194	1177		1168	1180
37.0		78.1	56.7	39.4	347	341	3.30	1200	1153	1171	1148	1144	1176	1161		1153	1163
36.5		77.8	56.2	38.8	342	336	3.32	1185	1138	1153	1131	1128	1158	1146		1138	1147
36.0		77.5	55.8	38.2	338	332	3.34	1170	1124	1136	1115	1111	1141	1130		1123	1131
35.5		77.2	55.3	37.6	333	327	3.37	1156	1109	1120	1099	1095	1125	1115		1109	1115
35.0		77.0	54.8	37.0	329	323	3.39	1141	1095	1104	1084	1079	1108	1101		1095	1100
34.5		76.7	54.4	36.5	324	318	3.41	1127	1082	1088	1069	1064	1092	1086		1081	1085
34.0		76.4	53.9	35.9	320	314	3.43	1113	1068	1072	1054	1049	1077	1073		1067	1070
33.5		76.1	53.4	35.3	316	310	3.46	1100	1055	1057	1040	1035	1062	1059		1054	1056
33.0		75.8	53.0	34.7	312	306	3.48	1086	1042	1042	1027	1020	1047	1046		1041	1042
32.5		75.5	52.5	34.1	308	302	3.50	1073	1029	1027	1013	1007	1032	1033		1028	1028
32.0		75.2	52.0	33.5	304	298	3.52	1060	1016	1013	1001	993	1018	1020		1015	1015
31.5		74.9	51.6	32.9	300	294	3.54	1047	1004	999	988	980	1005	1008		1003	1001
31.0		74.7	51.1	32.3	296	291	3.56	1034	991	985	976	967	991	996		990	989
30.5		74.4	50.6	31.7	292	287	3.59	1021	979	972	964	955	978	985		978	976
30.0		74.1	50.2	31.1	289	283	3.61	1009	967	959	953	943	966	973		966	964
29.5		73.8	49.7	30.5	285	280	3.63	997	955	946	942	931	953	962		954	951
29.0		73.5	49.2	29.9	281	276	3.65	984	943	933	932	919	941	951		942	940
28.5		73.3	48.7	29.3	278	273	3.67	972	932	921	922	908	930	941		931	928
28.0		73.0	48.3	28.7	274	269	3.70	961	920	909	912	897	918	930		919	917
27.5		72.7	47.8	28.1	271	266	3.72	949	909	897	902	887	907	920		908	906
27.0		72.4	47.3	27.5	268	263	3.74	937	898	886	893	877	897	910		897	895
26.5		72.2	46.9	26.9	264	260	3.76	926	887	875	884	867	886	901		885	884
26.0		71.9	46.4	26.3	261	257	3.78	914	876	864	876	857	876	892		875	874
25.5		71.6	45.9	25.7	258	254	3.80	903	865	853	868	847	866	882		864	864

(续)

硬 度								抗 拉 强 度 /MPa									
洛 氏		表面洛氏			维氏	布 氏		碳钢	铬钢	铬钒钢	铬镍钢	铬钼钢	铬镍 钼钢	铬锰 硅钢	超高 强度钢	不锈钢	不分 钢种
HRC	HRA	15-N	30-N	45-N	HV	HB 30D ²	d/mm 10/3000										
25.0		71.4	45.5	25.1	255	251	3.83	892	855	843	860	838		874		853	854
24.5		71.1	45.0	24.5	252	248	3.85	881	844	833	852	830		865		843	844
24.0		70.8	44.5	23.9	249	245	3.87	870	834	823	845	821		856		832	835
23.5		70.6	44.0	23.3	246	242	3.89	860	824	813	838	813		848		822	825
23.0		70.3	43.6	22.7	243	240	3.91	849	814	803	831	805		840		812	816
22.5		70.0	43.1	22.1	240	237	3.93	839	804	794	825	797		832		802	808
22.0		69.8	42.6	21.5	237	234	3.95	829	794	785	819	789		825		792	799
21.5		69.5	42.2	21.0	234	232	3.97	819	785	776	813	782		817		782	791
21.0		69.3	41.7	20.4	231	229	4.00	809	775	767	807	775		810		773	782
20.5		69.0	41.2	19.8	229	227	4.02	799	766	759	802	768		803		764	774
20.0		68.8	40.7	19.2	226	225	4.03	790	757	751	797	761		796		754	767
19.5		68.5	40.3	18.6	223	222	4.05	780	748	743	792	755		789		745	759
19.0		68.3	39.8	18.0	221	220	4.07	771	739	735	788	749		782		737	752
18.5		68.0	39.3	17.4	218	218	4.09	762	731	727	783	743		776		728	744
18.0		67.8	38.9	16.8	216	216	4.11	753	723	719	779	737		769		719	737
17.5		67.6	38.4	16.2	214	214	4.13	744	714	712	775	731		763		711	731
17.0		67.3	37.9	15.6	211	211	4.15	736	706	705	772	726		757		703	724

表 22-23 钢铁硬度及强度换算表(二)

硬 度							抗拉强度 /MPa
洛 氏	表 面 洛 氏			维 氏	布 氏		
HRB	15-T	30-T	45-T	HV	HB10 D^2	$d/mm; 10/1000$	
100.0	91.5	81.7	71.7	233			803
99.5	91.3	81.4	71.2	230			793
99.0	91.2	81.0	70.7	227			783
98.5	91.1	80.7	70.2	225			773
98.0	90.9	80.4	69.6	222			763
97.5	90.8	80.1	69.1	219			754
97.0	90.6	79.8	68.6	216			744
96.5	90.5	79.4	68.1	214			735
96.0	90.4	79.1	67.6	211			726
95.5	90.2	78.8	67.1	208			717
95.0	90.1	78.5	66.5	206			708
94.5	89.9	78.2	66.0	203			700
94.0	89.8	77.8	65.5	201			691
93.5	89.7	77.5	65.0	199			683
93.0	89.5	77.2	64.5	196			675

(续)

硬 度							抗拉强度 /MPa
洛 氏	表 面 洛 氏			维 氏	布 氏		
HRB	15-T	30-T	45-T	HV	HB10 D^2	$d/mm; 10/1000$	
92.5	89.4	76.9	64.0	194			667
92.0	89.3	76.6	63.4	191			659
91.5	89.1	76.2	62.9	189			651
91.0	89.0	75.9	62.4	187			644
90.5	88.8	75.6	61.9	185			636
90.0	88.7	75.3	61.4	183			629
89.5	88.6	75.0	60.9	180			621
89.0	88.4	74.6	60.3	178			614
88.5	88.3	74.3	59.8	176			607
88.0	88.1	74.0	59.3	174			601
87.5	88.0	73.7	58.8	172			594
87.0	87.9	73.4	58.3	170			587
86.5	87.7	73.0	57.8	168			581
86.0	87.6	72.7	57.2	166			575
85.5	87.5	72.4	56.7	165			568
85.0	87.3	72.1	56.2	163			562
84.5	87.2	71.8	55.7	161			556
84.0	87.0	71.4	55.2	159			550
83.5	86.9	71.1	54.7	157			545
83.0	86.8	70.8	54.1	156			539
82.5	86.6	70.5	53.6	154	140	2.98	534
82.0	86.5	70.2	53.1	152	138	3.00	528
81.5	86.3	69.8	52.6	151	137	3.01	523
81.0	86.2	69.5	52.1	149	136	3.02	518
80.5	86.1	69.2	51.6	148	134	3.05	513
80.0	85.9	68.9	51.0	146	133	3.06	508
79.5	85.8	68.6	50.5	145	132	3.07	503
79.0	85.7	68.2	50.0	143	130	3.09	498
78.5	85.5	67.9	49.5	142	129	3.10	494
78.0	85.4	67.6	49.0	140	128	3.11	489
77.5	85.2	67.3	48.5	139	127	3.13	485
77.0	85.1	67.0	47.9	138	126	3.14	480
76.5	85.0	66.6	47.4	136	125	3.15	476
76.0	84.8	66.3	46.9	135	124	3.16	472
75.5	84.7	66.0	46.4	134	123	3.18	468
75.0	84.5	65.7	45.9	132	122	3.19	464
74.5	84.4	65.4	45.4	131	121	3.20	460

(续)

硬 度							抗拉强度 /MPa
洛 氏	表 面 洛 氏			维 氏	布 氏		
HRB	15-T	30-T	45-T	HV	HB10 D^2	$d/mm; 10/1000$	
74.0	84.3	65.1	44.8	130	120	3.21	456
73.5	84.1	64.7	44.3	129	119	3.23	452
73.0	84.0	64.4	43.8	128	118	3.24	449
72.5	83.9	64.1	43.3	126	117	3.25	445
72.0	83.7	63.8	42.8	125	116	3.27	442
71.5	83.6	63.5	42.3	124	115	3.28	439
71.0	83.4	63.1	41.7	123	115	3.29	435
70.5	83.3	62.8	41.2	122	114	3.30	432
70.0	83.2	62.5	40.7	121	113	3.31	429
69.5	83.0	62.2	40.2	120	112	3.32	426
69.0	82.9	61.9	39.7	119	112	3.33	423
68.5	82.7	61.5	39.2	118	111	3.34	420
68.0	82.6	61.2	38.6	117	110	3.35	418
67.5	82.5	60.9	38.1	116	110	3.36	415
67.0	82.3	60.6	37.6	115	109	3.37	412
66.5	82.2	60.3	37.1	115	108	3.38	410
66.0	82.1	59.9	36.6	114	108	3.39	407
65.5	81.9	59.6	36.1	113	107	3.40	405
65.0	81.8	59.3	35.5	112	107	3.40	403
64.5	81.6	59.0	35.0	111	106	3.41	400
64.0	81.5	58.7	34.5	110	106	3.42	398
63.5	81.4	58.3	34.0	110	105	3.43	396
63.0	81.2	58.0	33.5	109	105	3.43	394
62.5	81.1	57.7	32.9	108	104	3.44	392
62.0	80.9	57.4	32.4	108	104	3.45	390
61.5	80.8	57.1	31.9	107	103	3.46	388
61.0	80.7	56.7	31.4	106	103	3.46	386
60.5	80.5	56.4	30.9	105	102	3.47	385
60.0	80.4	56.1	30.4	105	102	3.48	383

9. 典型硬度计(表 22-24 ~ 表 22-27)

表 22-24 TH 型洛氏硬度计的主要技术指标

型号	TH300	TH310	TH320
硬度标尺	洛氏 ABCDEFGHKLMPSV	表面洛氏 15/30/45N/T/W/X/Y	洛氏 ABCDEFGHKLMPSV, 表面洛氏 15/30/45N/T/W/X/Y
分辨力	0.1 洛氏单位		
初试验力	98.07N/10kgf	29.42N/3kgf	98.07N/10kgf, 29.42N/3kgf
总试验力	588.4N/60kgf, 980.7N/100kgf, 1471N/150kgf	147.1N/15kgf, 294.2N/30kgf, 441.3N/45kgf	588.4N/60kgf, 980.7N/100kgf, 1471N/150kgf, 147.1N/15kgf, 294.2N/30kgf, 441.3N/45kgf
显 示	高清晰背光点阵 LCD		
菜单文本	中文, 英文	中文, 英文	中文, 英文, 法文, 德文
操作方法	薄膜按键		
测试过程	自动完成		
试验力加载时间	1 ~ 50s, 可设定并动态显示、存储		

(续)

型号	TH300	TH310	TH320
辅助功能	上下限设置,超差判别,数据统计,求平均值,标准差,最大最小值;标尺转换,可将测试结果转换为布氏、维氏、里氏、表面洛氏硬度以及抗拉强度 σ_b ;曲面修正,对柱面、球面测量结果自动修正	上下限设置,超差判别,数据统计,求平均值,标准差,最大最小值;标尺转换,可将测试结果转换为布氏、维氏、努普强度 σ_b ;曲面修正,对柱面、球面测量结果自动修正	上下限设置,超差判别,声音和屏幕显示报警;数据统计,求平均值,标准差,最大最小值;标尺转换,可将测试结果转换为布氏 HB、维氏 HV、里氏 HLD、努普硬度 HK,以及抗拉强度 σ_b ;曲面修正,对柱面、球面测量结果自动修正
执行标准	GB/T 2848—1992, JB/T 7409—1994 ISO6508	GB/T 3773—1993, BSEN10109—96ISO6508.2、ASTME-18	GB/T 2848—1992GB/T3773—1993 JB/T7409—1994, ISO6508.2—99
最大测试空间	垂直方向 250mm,水平方向 150mm		
测试零件种类	平面柱面最小外径 3mm;内环表面最小内径 23mm		
供电	22V/110V, 50Hz, 4A		
尺寸	715mm × 225mm × 790mm	720mm × 225mm × 790mm	720mm × 240mm × 815mm
净重	100kg	70kg	100kg

表 22-25 便携式内孔硬度计

型 号	测试直径/mm	测孔深度/mm	精 度
N6N	35 ~ 110	120	$\pm 2\text{HRC} \geq 20 \leq 50$ $\pm 21.5\text{HRC} \geq 50 \leq 60$
N6P	35 ~ 110	400	
N6R	35 ~ 110	900	

注:1. 加特殊装置内孔测试直径达 410mm。
2. 可选择 HRA/HR15N/HR30N/HR45N/HR2.5/62.5 测试方法。

表 22-26 便携式齿轮硬度计规格参数

型号	规 格	精度
NFF	模数 2 ~ 10 最大公法线长度 140mm 节圆直径 30 ~ 40mm	$\pm 2\text{HRC} \geq (20 \leq 50)$
NFN	模数 3 ~ 35 最大公法线长度 400mm	
NFP	模数 3 ~ 35 最大公法线长度 700mm	
NFR	模数 3 ~ 35 最大公法线长度 1000mm	
NFS	模数 3 ~ 35 最大公法线长度 1500mm	
NFH	内齿模数 > 3 公法线长度 80 ~ 118mm	
N9Y	螺旋面模数 3 ~ 32	

注:1. N7N/N7P/N7R/N7S 带特殊装置时,模数可达 35 ~ 70。
2. 可选择 HRA/HR15N/HR30N/HR45N 测试方法。

表 22-27 CV 全能数显手持式硬度计的测量范围和分辨率

硬度值	测量范围	分辨率	硬度值	测量范围	分辨率
维氏	35 ~ 100	5	洛氏 C	20 ~ 70	1
布氏	100 ~ 500	5	N/mm	255 ~ 1999	1
洛氏 B	30 ~ 100	1	邵氏回弹硬度	24 ~ 97	1

22.3 金相组织检验 (表 22-28 ~ 表 22-30, 图 22-1)

表 22-28 部分常用的腐蚀剂配比及用途

腐 蚀 剂 配 比	主 要 适 用 范 围
2% ~ 3% 硝酸-酒精溶液	显示碳钢及低合金钢的显微组织

(续)

腐 蚀 剂 配 比	主 要 适 用 范 围
4% ~ 10% 硝酸-酒精溶液	显示淬火钢及高合金钢的显微组织
苦味酸饱和水溶液, 加入约 2% 烷基磺酸钠(或洗涤剂)	显示淬火钢或淬火-回火钢的原奥氏体晶界
2% 苦味酸、25% 氢氧化钠—水溶液	显示渗碳晶粒度: 煮沸 10 ~ 20min, 渗碳体呈棕色 显示渗硼层组织: 煮沸 5 ~ 10min, FeB 呈浅蓝色, Fe ₂ B 呈黄色
5% ~ 20% 三氯化铁, 20% ~ 30% 盐酸—水溶液	显示奥氏体不锈钢显微组织与晶界
2% 焦亚硫酸钾、饱和硫代硫酸钠水溶液	显示双相钢显微组织: 铁素体呈浅蓝或深蓝色, 马氏体呈褐色或黑色, 残留奥氏体呈白色 显示由于硫偏析引起的过热或过烧钢的晶界: 过热—白色晶界网络, 过烧—黑色晶界网络
2.5% 硝酸、1.5% 盐酸、1% 氢氟酸—水溶液	显示铝合金的显微组织与晶界
2% 氢氧化钠、4% 碳酸钠—水溶液	显示纯铝的晶界
3% ~ 5% 三氯化铁、20% ~ 30% 盐酸—水溶液	显示铜及铜合金的显微组织与晶界

表 22-29 彩色金相的应用实例

应用领域	材料及处理状态	显示方法	显微组织特征
钢铁材料显微组织的鉴别	1. T8 钢, 等温淬火	化染, 试剂: 氟化氰氨 5g、蒸馏水 100mL, 250℃, 60s	下贝氏体(黄绿色) 马氏体(红褐色) 残留奥氏体(浅棕色)
	2. 30CrMnSi 钢, 等温淬火	化染, 试剂: 100mL(盐酸[35%] + 蒸馏水[1:0.5 ~ 2])加焦亚硫酸钾 0.6 ~ 1g, 加氯化铁 1 ~ 3g, 或氯化铜 1g 或氟化氢氨 2 ~ 10g; 28℃, 50s	下贝氏体(青绿色) 马氏体(棕红色黄色) 残留奥氏体(白色)
	3. 35CrNi3Mo 钢, 等温淬火	化染, 试剂: 100mL(盐酸[35%] + 蒸馏水[1:0.5 ~ 2])加焦亚硫酸钾 0.6 ~ 1g, 加氯化铁 1 ~ 3g, 或氯化铜 1g 或氟化氢氨 2 ~ 10g; 28℃, 50s	下贝氏体(蓝绿色) 马氏体(红色) 残留奥氏体(黄色)
	4. 00Cr17Ni4Mo 钢, 退火	恒电位腐蚀, 10% 铁氰化钾 + 10% KOH + 水, 4V, 20 ~ 40s	奥氏体(因位向不同, 各个晶粒呈现不同颜色)
	5. 球墨铸铁	化染, 试剂: 硫代硫酸钠 240g、氯化镉 20 ~ 50g、柠檬酸 30g、蒸馏水 1000mL, 目测蓝紫色	石墨(黑色球) 铁素体(桔黄色) 珠光体(蓝紫色、黄绿色)
	6. Cr12MoV 钢, 淬火, 200℃回火	化染, 试剂: 硫代硫酸钠 240g、氯化镉 20 ~ 50g、柠檬酸 30g、蒸馏水 1000mL, 20℃, 1.5min(4% 硝酸酒精预蚀)	碳化物(黄色、淡青色、棕色) 回火马氏体与残留奥氏体(蓝、绿色基体)
	7. Mn13 钢, 铸态	化染, 试剂: 硫代硫酸钠 240g、氯化镉 20 ~ 50g、柠檬酸 30g、蒸馏水 1000mL, 20℃, 1.5min(4% 硝酸酒精预蚀)	奥氏体(粉色、青色、淡黄色) 碳化物(白色)

(续)

应用领域	材料及处理状态	显示方法	显微组织特征
钢铁材料显微组织的鉴别	8. Mn13 钢, 淬火	化染, 试剂: 硫代硫酸钠 240g、氯化镉 20 ~ 50g、柠檬酸 30g、蒸馏水 1000mL, 20℃, 1.5min(4% 硝酸酒精预蚀)	奥氏体(红色) 碳化物(黄绿色)
	9. Cr17Mn13Mo2N 钢, 固溶化, 水冷	化染, 试剂: 硫代硫酸钠 240g、氯化镉 20 ~ 50g、柠檬酸 30g、蒸馏水 1000mL, 20℃, 1.5min(4% 硝酸酒精预蚀)	奥氏体(黄绿色、蓝色) δ 铁素体(粉红色)
	10. Cr17Ni2 钢, 淬火 650 ~ 680℃ 回火	化染, 试剂: 盐酸(35%) 5 ~ 10mL、硒酸 1 ~ 3mL、酒精(95%) 100mL, 25℃, 30s	铁素体(浅褐色) 回火索氏体(蓝绿色)
	11. 28Cr2MoVA 钢, 等温淬火	化染, 试剂: 硫代硫酸钠 240g、氯化镉 20 ~ 50g、柠檬酸 30g、蒸馏水 1000mL, 目测蓝紫色,(4% 硝酸酒精预蚀)	上贝氏体(深棕色) 板条马氏体(黄绿色) 残留奥氏体(粉色)
	12. W18Cr4V 钢, 淬火, 560℃ 回火	化染, 试剂: 硫代硫酸钠 240g、氯化镉 20 ~ 50g、柠檬酸 30g、蒸馏水 1000mL, 目测蓝紫色,(4% 硝酸酒精预蚀)	碳化物(黄色、淡红色) 回火马氏体(青绿色) 残留奥氏体(黄色)
	13. W6Mo5Cr4V2 钢, 淬火, 560℃ 回火	化染, 试剂: 硫代硫酸钠 240g、氯化镉 20 ~ 50g、柠檬酸 30g、蒸馏水 1000mL, 目测蓝紫色,(4% 硝酸酒精预蚀)	碳化物(黄绿色、青绿色) 回火马氏体与残留奥氏体(棕色基体)
	14. 亚共晶白口铸铁	化染, 试剂: 硫代硫酸钠 240g、氯化镉 20 ~ 50g、柠檬酸 30g、蒸馏水 1000mL, 目测蓝紫色,(4% 硝酸酒精预蚀)	珠光体(深绿色) 莱氏体(浅粉色渗碳体基体上分布绿色珠光体)
	15. 共晶白口铸铁	化染, 试剂: 硫代硫酸钠 240g、氯化镉 20 ~ 50g、柠檬酸 30g、蒸馏水 1000mL, 目测蓝紫色,(4% 硝酸酒精预蚀)	珠光体(绿色) 渗碳体(黄色)
	16. 过共晶白口铸铁	化染, 试剂: 硫代硫酸钠 240g、氯化镉 20 ~ 50g、柠檬酸 30g、蒸馏水 1000mL, 目测蓝紫色,(4% 硝酸酒精预蚀)	渗碳体(黄色) 莱氏体(浅粉色基体上分布绿色珠光体)
	17. 高铬铸铁(Cr20%, C2.8% ~ 2.9%)	化染, 试剂: 硫代硫酸钠 240g、氯化镉 20 ~ 50g、柠檬酸 30g、蒸馏水 1000mL, 目测蓝紫色,(4% 硝酸酒精预蚀)	Cr_7C_3 相(淡蓝色) 共析体(Cr_7C_3 附近贫铬区形成的紫色与黄色相间的共析组织) 莱氏体(绿色、黄色、紫红色三种相组成)
	18. 奥氏体—贝氏体球墨铸铁, 等温处理	化染, 试剂: 焦亚硫酸钾 0.5g、氟化氢氨 20g、蒸馏水 100mL, 目测蓝紫色	游离渗碳体(白色) 马氏体(棕色) 贝氏体(蓝绿色) 奥氏体(基体)

(续)

应用领域	材料及处理状态	显示方法	显微组织特征
热处理 渗层 显示	19. 20Cr2Ni4 钢, 渗碳 淬火	化染, 试剂: 硫代硫酸钠 240g、氯化镉 20 ~ 50g、柠檬酸 30g、蒸馏水 1000mL, 目测蓝紫色	针状马氏体(蓝色) 残留奥氏体(深棕色)
	20. 18CrNi4WA 钢, 渗碳 淬火	化染, 试剂: 硫代硫酸钠 240g、氯化镉 20 ~ 50g、柠檬酸 30g、蒸馏水 1000mL, 目测蓝紫色, (4% 硝酸酒精预蚀)	针状马氏体(蓝黑色) 残留奥氏体(淡紫色、黄色、蓝色)
	21. 38CrMoAl 钢, 气体渗 氮	化染, 试剂: 硫代硫酸钠 240g、氯化镉 20 ~ 50g、柠檬酸 30g、蒸馏水 1000mL, 目测蓝紫色, (4% 硝酸酒精预蚀)	ϵ 相(黄色) $\epsilon + \gamma$ (绿色) 扩散层(黄变青紫色) 低氮合金铁素体(红色)
	22. 30CrMnSi 钢, 1000℃ 固体渗铬, 淬火	化染, 试剂: 硫代硫酸钠 240g、氯化镉 20 ~ 50g、柠檬酸 30g、蒸馏水 1000mL, 目测蓝紫色, (4% 硝酸酒精预蚀)	$Cr_2(NC)$ (黄色) $(FeCr)_{23}C_6$ (白色) $(FeCr)_7C_3$ (红色)
	23. 20CrNi4A 钢, 850℃ 氮碳共渗, 淬火	化染, 试剂: 硫代硫酸钠 240g、氯化镉 20 ~ 50g、柠檬酸 30g、蒸馏水 1000mL, 目测蓝紫色, (4% 硝酸酒精预蚀)	碳氮化合物(白色) 马氏体(绿色、红色) 残留奥氏体(棕→蓝→黄)
	24. 45 钢, 氮碳共渗	化染, 试剂: 盐酸(35%) 2mL、硒酸 0.5mL、酒精(95%) 300mL, 30℃, 1min	ϵ 相(淡粉色) γ' (紫色) 铁素体(因位向不同呈不同颜色) 珠光体(黄绿色)
	25. 20 钢或 45 钢 900℃ 固体渗硼	化染, 试剂: 黄血盐 1g、赤血盐 10g、氢氧化钾 30g、蒸馏水 100mL, 45℃, 1min	FeB(黄棕色) Fe_2B (黄色) $Fe_3(C, B)$ (棕蓝色)
非 铁 合 金 中 相 的 鉴 别	26. ZL102 合金, 铸造	化染, 试剂: 钼酸铵 5g、硫代硫酸钠 10g、氢氧化铵 20mL、蒸馏水 100mL	α 固溶体(青色) ($\alpha + Si$) 共晶(棕色、蓝色)
	27. ZL109 合金, 铸造	化染, 试剂: 钼酸铵 5g、硫代硫酸钠 10g、氢氧化铵 20mL、蒸馏水 100mL, 目测棕红色	Mg_2Si (黑色) Al—Si—Mg—Fe—Ni (蓝绿色) Al_3Ni (桔红色、黄色) 共晶硅(深蓝色)
	28. 铝钛合金 (Al— 3Ti), 铸造	化染, 试剂: 钼酸铵 5g、硫代硫酸钠 10g、氢氧化铵 20mL、蒸馏水 100mL, 目测棕红色	Al_3Ti (蓝紫色) α 固溶体(基体)
	29. 过共晶硅活塞合金 (Si25%, Cu1.2%, Ni1.3, Mg1.1%, Cr0.6%), 铸造	化染, 试剂: 钼酸铵 5g、硫代硫酸钠 10g、氢氧化铵 20mL、蒸馏水 100mL, 目测棕红色	Si—Cr—Al—Fe 相(蓝紫色) Al—Si—Mg—Fe—Ni 相(棕黄色) Al—Ni—Si—Mg 相(紫红色) 初晶硅(棕蓝色)

(续)

应用领域	材料及处理状态	显示方法	显微组织特征
非铁合金中相的鉴别	30. 材料同上, 铸造后, 510℃固溶淬火, 210℃时效	化染, 试剂: 钼酸铵 5g、硫代硫酸钠 10g、氢氧化铵 20mL、蒸馏水 100mL, 目测棕红色	Si—Cr—Al—Fe 相(淡黄色) 初晶硅(棕蓝色)
	31. ZHSi65—1.5—3 铸造	化染, 试剂: 盐酸(35%)2mL、硒酸 0.5mL、酒精(95%)、300mL, 20℃, 5s	α 相(青色) β 相(淡黄色)
	32. TC10 合金 (Ti6Al6V2Sn-0.5Cu0.5Fe) 1050℃加热空气冷却	热染(管式炉加热), 480 ~ 500℃, 目测蓝紫色	α 相(黄褐色) β 相(青色)
	33. 硬质合金(YT14), 粉末冶金	热染(铅浴加热), 400 ~ 500℃, 目测红色	WC(天蓝色) Co(淡红色) TiC(黄色)

注: 成分和组成均指质量分数。

表 22-30 常见夹杂物的特征

名称及化学式	存在形态及分布特征	光学特征			晶型
		明场	暗场	偏光	
氧化亚铁 FeO 以及 $\text{FeO} \cdot \text{MnO}(\text{FeMn})\text{O}$	一般呈球形, 变形后呈椭圆, 分布无规律	FeO 为灰色随 Mn 量增加由灰色到灰紫色	FeO 不透明随 MnO 含量增加, 透明度增加, 颜色呈白红色	各向同性	立方晶系
氧化铝 Al_2O_3 (刚玉)	大多数情况下呈不规则形状的细小颗粒, 成群聚集分布, 热轧后呈链串状	暗灰色	透明	弱各向异性	六方晶系
玻璃质 SiO_2	呈各种尺寸的圆球, 不变形	黑色	闪光, 很透明	各向同性有黑十字特征	非晶态
铝酸盐, 铁尖晶石 $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	规则的立方形, 颗粒不变形, 易碎裂	暗灰色		各向同性透明, 灰绿色	立方晶系
铝酸钙 $\text{CaO} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$	不规则球形, 变形后破碎呈链串状分布	灰色	透明, 亮黄色	弱各向异性	单斜, 六方晶系
铁硅酸盐及铁锰硅酸盐 $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$, $n\text{FeO} \cdot m\text{MnO} \cdot \text{PSiO}_2$	铸态下呈球形, 易变形, 热变形后沿变形方向拉长	暗灰色	透明, 由亮红到暗黑随成分而变	各向异性	正交晶系

(续)

名称及化学式	存在形态及分布特征	光 学 特 征			晶 型
		明 场	暗 场	偏 光	
铝硅酸盐 $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	呈三棱形和针状无规律不变形	深灰色	透明无色	各向异性	正交晶系
钙硅酸盐 $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	球状, 不易变形, 无规律分布	暗灰色有粗糙表面	透明发亮	各向同性	三斜、六方晶系
硫化铁 FeS	晶内或沿晶界分布, 变形后沿着受力方向拉长	亮黄色	不透明, 沿周边有亮线	各向异性淡黄色	六方晶系
硫化锰及其固溶体 MnS 或 MnS-FeS	晶内或沿晶界分布, 变形后沿着受力方向拉长	灰蓝色, 随 MnS 含量减少逐渐变至亮黄色	稍透明或不透明	各向同性	立方晶系
其他硫化物 TiS , ZrS_2 , CrS , Al_2S_3	铸态下呈针状沿晶界分布, 变形性差	不同程度黄色	不透明	各向异性	六方晶系
氮化钛或氮碳化钛, TiN 或 $\text{Ti}(\text{NC})$	规则几何外形, 常成群出现, 变形后呈串链状分布	金黄色, 随溶碳量增加逐渐变为紫色	不透明	各向同性	立方晶系
氮化锆 ZrN	规则几何外形, 常成群出现, 变形后呈串链状分布	柠檬黄	不透明	各向同性	立方晶系
氮化钒 VN 氮化铌 NbN	规则几何外形, 常成群出现, 变形后呈串链状分布	VN 为粉红色 NbN 为亮黄色	不透明	各向同性	立方晶系
氮化铝 AlN	规则形状, 不变形, 成群分布	紫灰色	不透明	强各向异性	六方晶系
稀土硫化物 RES_2 - RE_2S_3	细小颗粒, 成群分布 圆球或椭球状, 分散分布, 有时呈短串	金红色 淡灰色	不透明, 有亮边黑红色	各向同性 弱各向异性	面心立方 正交
$\gamma\text{-RE}_2\text{S}_3$	呈圆球状, 分散分布	淡灰色	不透明	各向同性	体心立方
稀土硫氧化物 $\text{RE}_2\text{O}_2\text{S}$	颗粒状, 易于成群分布	中灰色	深黄、橙黄	各向异性	六方
稀土氧化物 RE_2O_3	稍变形的条状和块状, 聚集分布	中灰色	浅黄、黄红	各向异性	六方
REAlO_3	不规则颗粒, 呈串链状	深灰色	灰黄带绿	弱异性或同性	立方
$\alpha\text{-(Mn, RE)S}$	沿加工方向延伸的长条状	浅灰色	不同程度的黄色	各向同性	立方

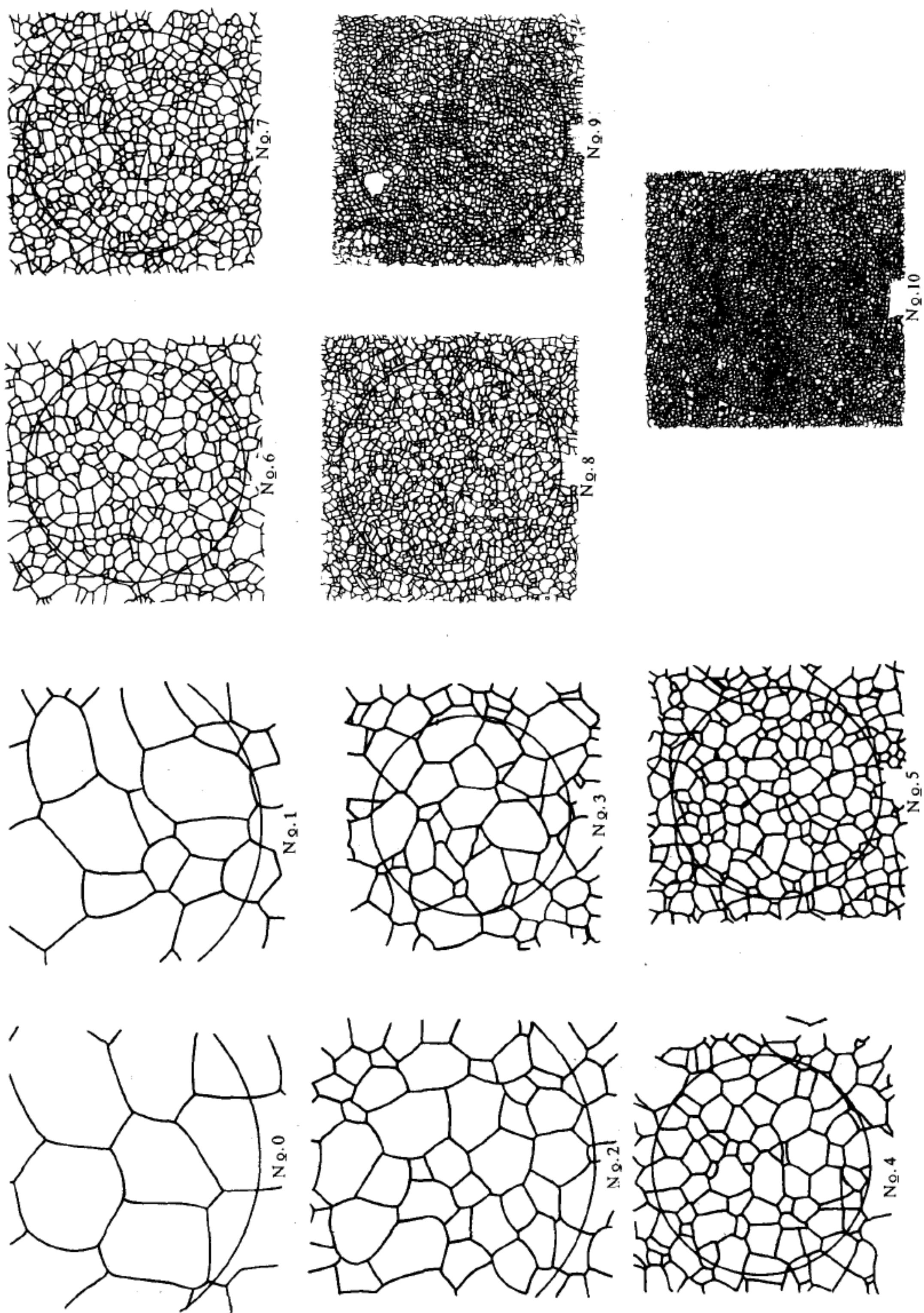


图 22-1

22.4 金属和合金性能的测试

力学性能试样及尺寸(表 22-31 ~ 表 22-35,图 22-2 ~ 图 22-14)

表 22-31 圆形拉伸试样的外形尺寸 (单位: mm)

d_0	D		r		h	
	一般 D	螺纹 D	带肩 r	螺纹 r	一般 h	螺纹 h
25	45	M36	5	12.5	30	40
20	34	M30	5	10	25	30
15	28	M24	4	7.5	20	25
10	16	M16	4	5	10	15
8	13	M14	3	4	10	15
6	12	M12	3	3.5	10	12
5	11	M9	3	3.5	10	10

表 22-32 圆形试样标距 L_0 内尺寸的允许偏差 (单位: mm)

公称直径	d_0	L_0	$d_{0max} - d_{0min}$
< 10	± 0.1	± 0.1	0.02
≥ 10	± 0.2	± 0.1	0.05

表 22-33 圆形铸铁拉伸试样的外形尺寸 (单位: mm)

毛坯直径	d_0	L_0		D	r_{min}	h_{min}
		灰铸铁	球 铁			
13	8	8	40	M12	12	16
18	10		50	M16	15	20
20	13	13	65	M18	30	24
30	20	20	100	M28	45	36
45	30	30	150	M42	68	50

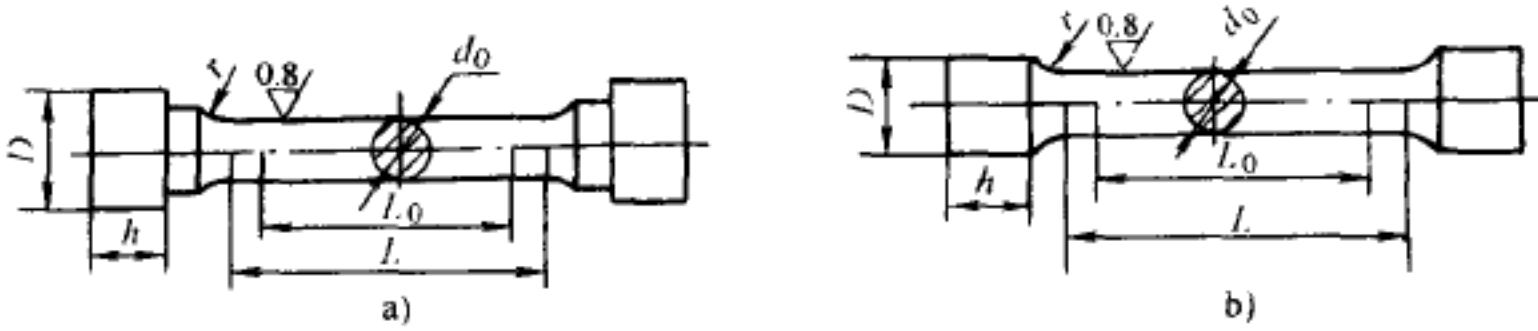


图 22-2 拉伸试样
a)一般试样 b)螺纹试样

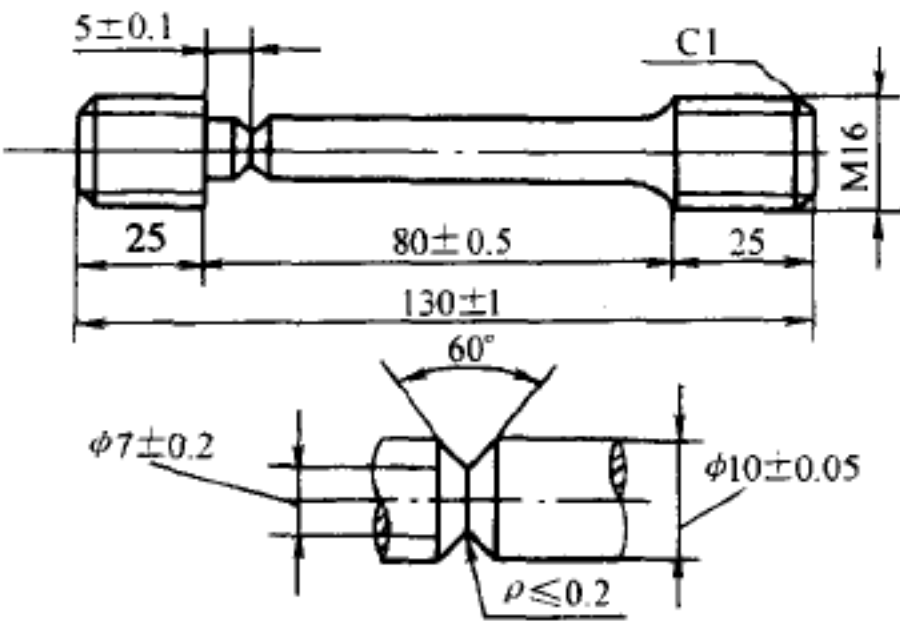


图 22-3 缺口拉伸试样

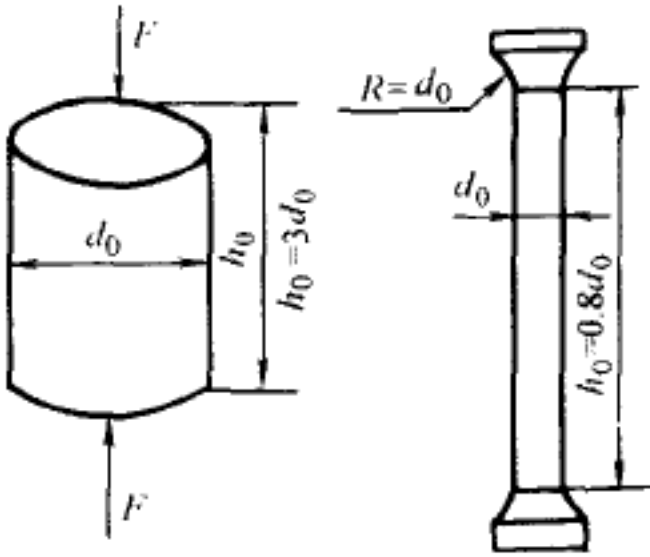


图 22-4 压缩试样

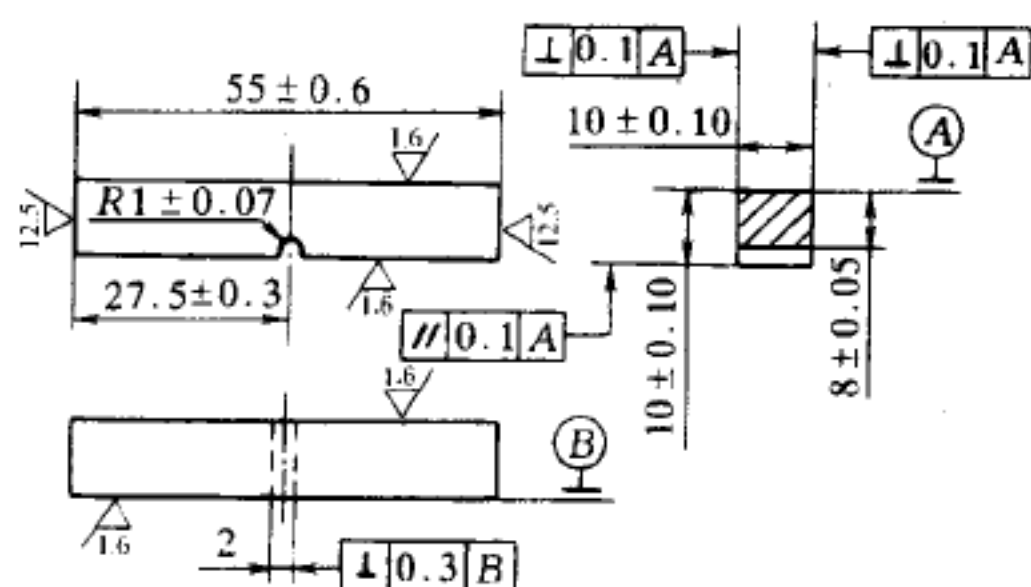


图 22-5 U形缺口冲击试样

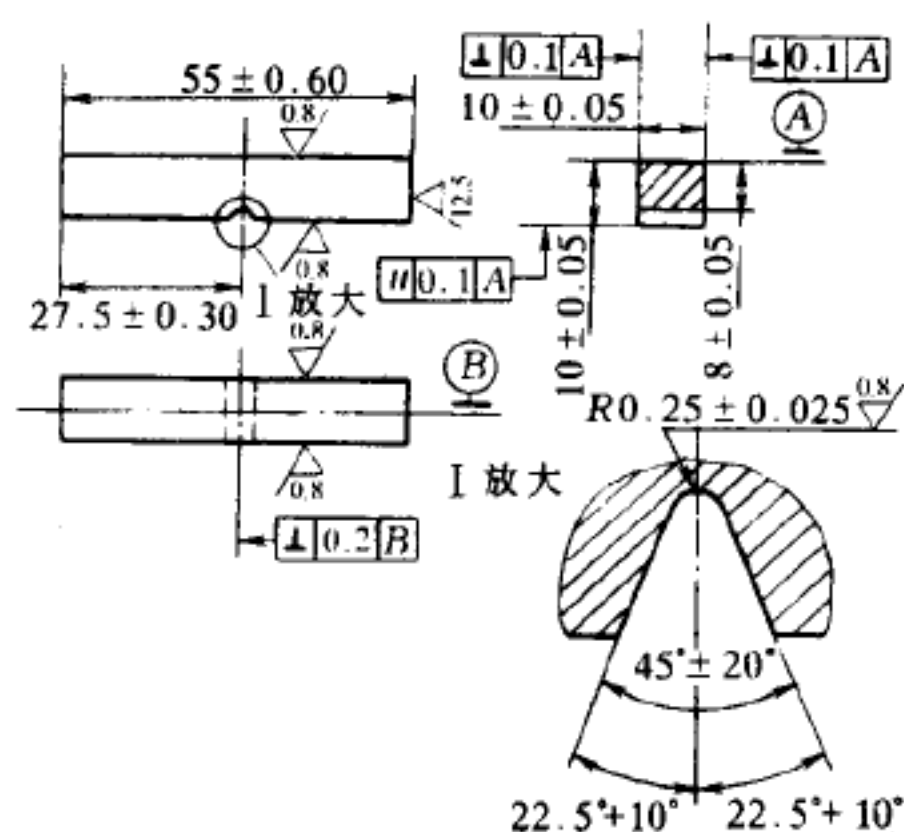


图 22-6 V形缺口冲击试样

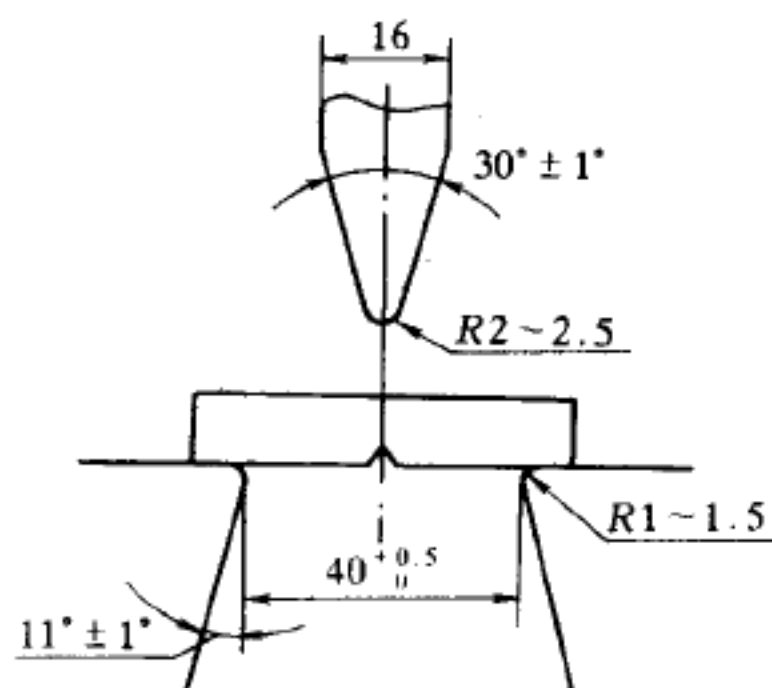


图 22-7 冲击试验示意图

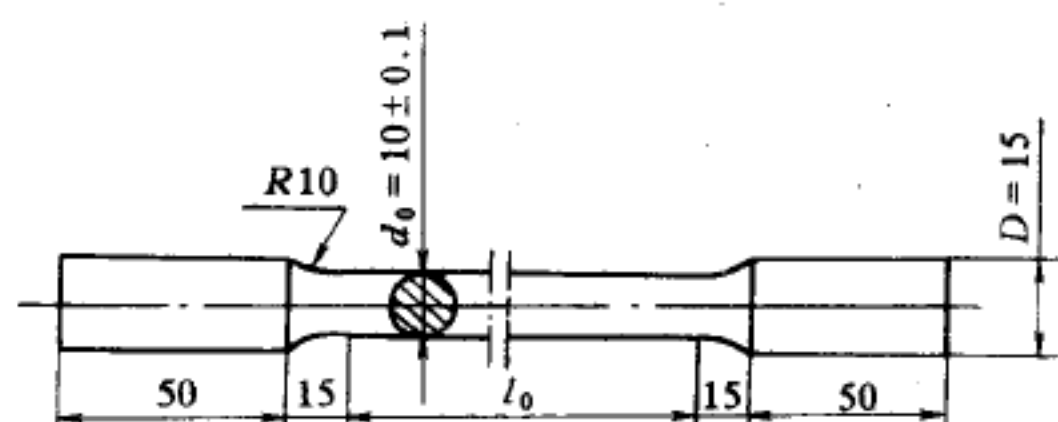


图 22-8 扭转试样

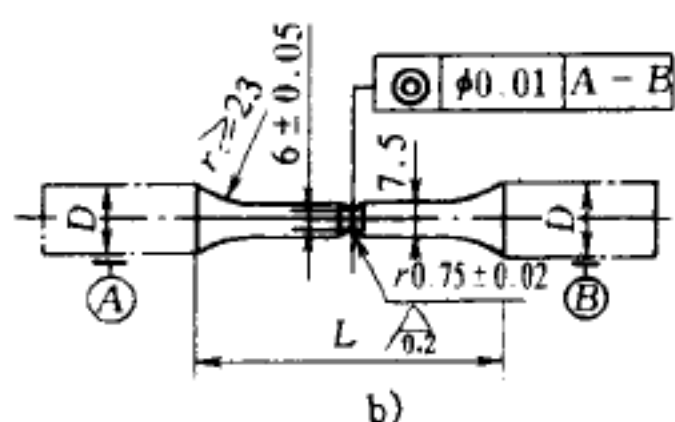
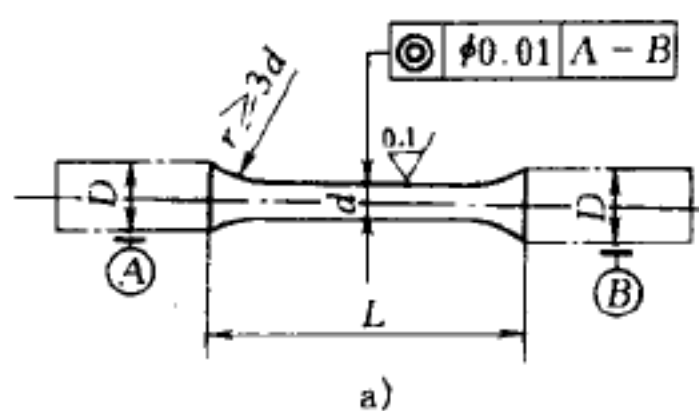


图 22-9 旋转弯曲疲劳试样

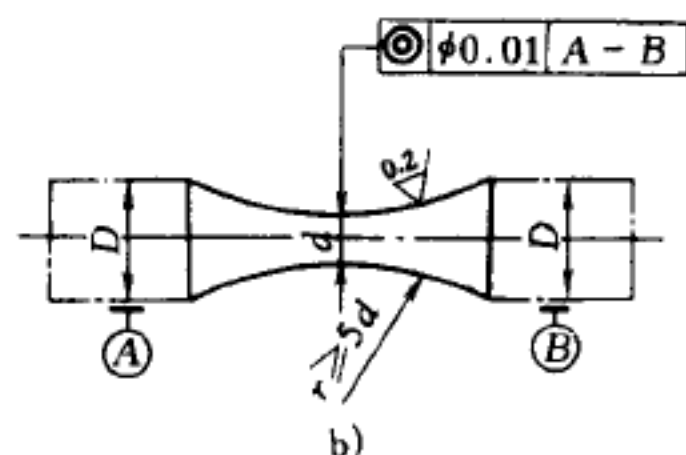
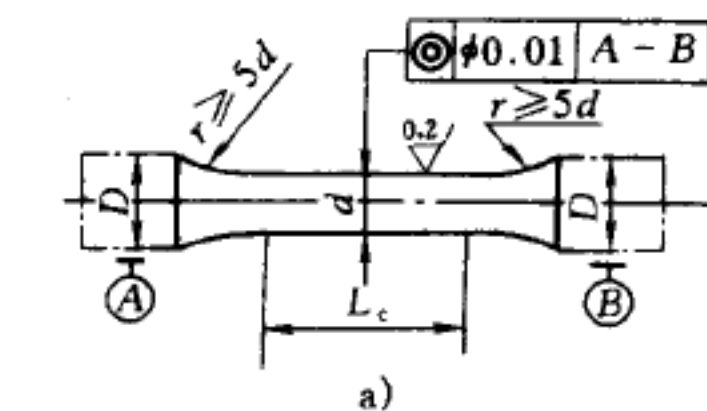
a) $K_t = 1$ b) $K_t = 1.86$ 

图 22-10 轴向拉压疲劳的圆形横截面试样

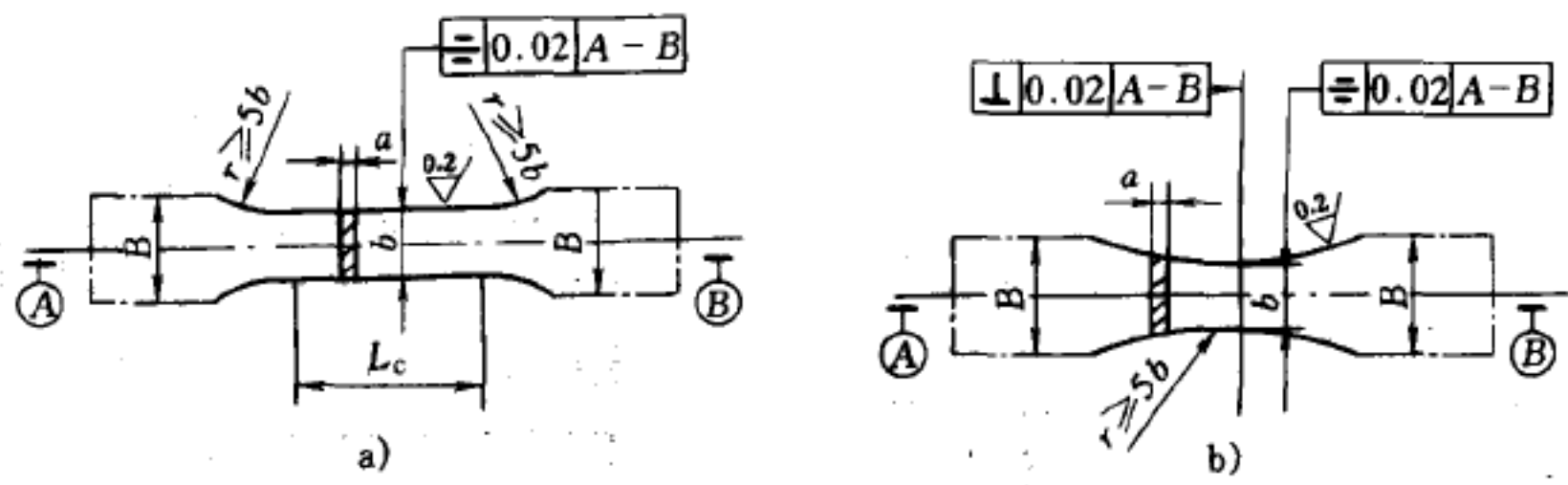


图 22-11 轴向拉压疲劳的矩形横截面试样

表 22-34 疲劳试样尺寸表

d/mm		ab/mm ² 面 积	b/mm	r/mm	L _c /mm	D ² /d ² 、B/d
标称尺寸	公 差					
6、8、10	± 0.02	≥ 30	(2 ~ 6) a ± 0.02	≥ 5d 或 5b	≥ 3d 或 3b	≥ 1.5

注：循环压缩应力试验时， $L_c < 4d$ 或 $< 4b$ ，特殊情况可用 $ab < 30\text{mm}^2$ 试样。

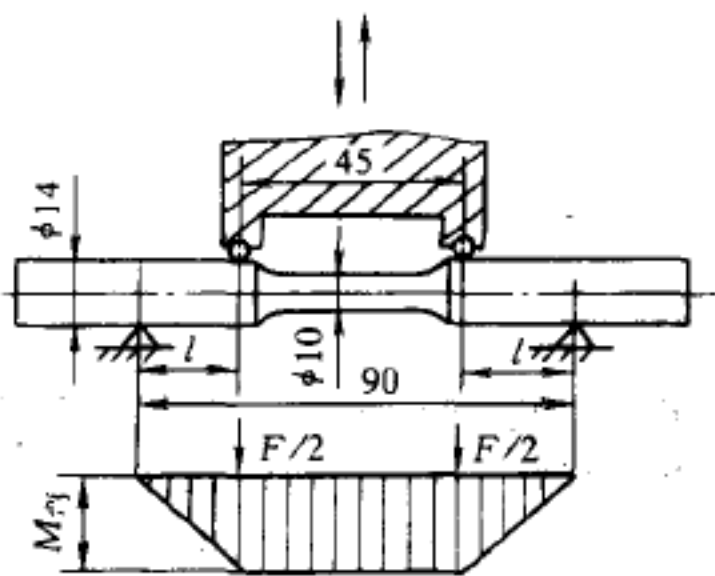


图 22-12 多冲弯曲疲劳试验

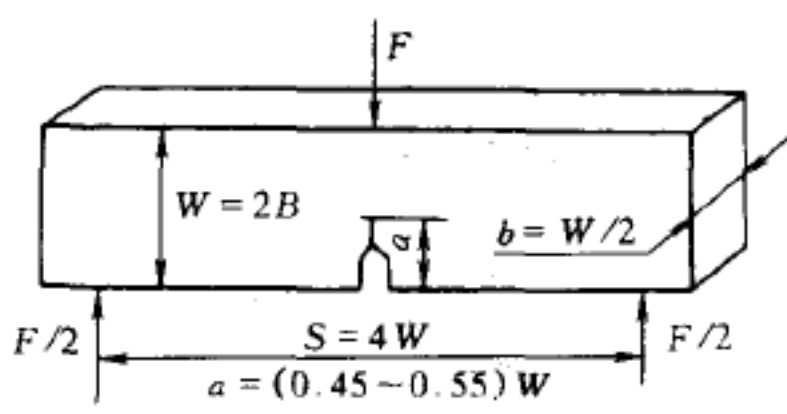


图 22-13 三点弯曲断裂韧度试样

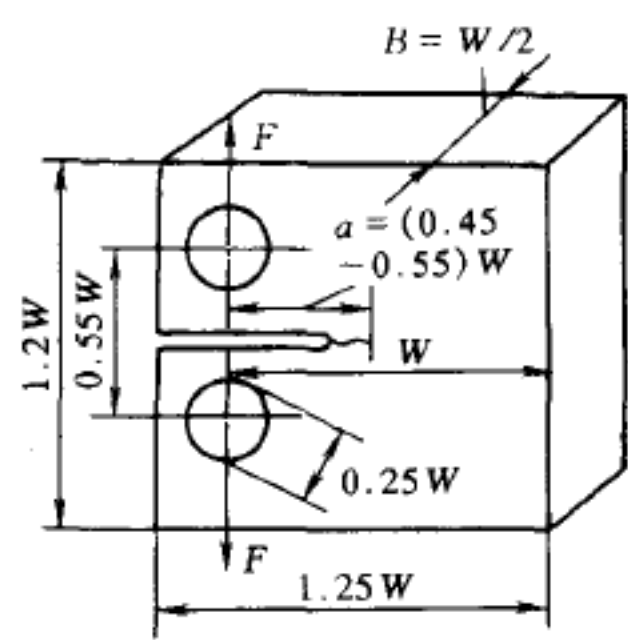


图 22-14 紧凑拉伸断裂韧度试样

表 22-35 几种合金结构钢的断裂韧度

材料及热处理	σ_s/MPa	σ_b/MPa	$K_{Ic}/(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$	注
18Ni 840℃空冷 480℃空冷	1746	1795	128	马氏体时效钢
20SiMn2MoV 900℃油淬 250℃回火	1214	1481	113	高强度低碳马氏体钢

(续)

材料及热处理	σ_s /MPa	σ_b /MPa	K_{Ic} /(MPa \sqrt{m})	注
40CrNiMo 860℃ 淬油 200℃ 回火 380℃ 回火 430℃ 回火	1579 1383 1334	1942 1486 1392	42 63 90	高强度中碳合金结构钢
30Cr2MoV 940℃ 空冷 680℃ 空冷	549	686	140 ~ 155	大型汽轮机转子用钢
18MnMoNiCr 880℃ 空冷 680℃ 空冷	461	586	280	厚壁压力容器用钢
45 钢, 正火	513	804	~ 100	大尺寸机车曲轴
球墨铸铁, 正火			34 ~ 36	大尺寸机车曲轴
W18Cr4V 1200℃ 淬火 560℃ 三次回火 1250℃ 淬火 560℃ 三次回火			16 15	高速钢
65Cr4W3Mo2V 1070℃ 淬火 540℃ 二次回火		62HRC	17	基体钢
65Cr4W3Mo2VNb (Nb0.26%) 处理同上		58.5HRC	25.6	含 Nb 基体钢

22.5 无损探伤和内应力测试

1. 磁粉探伤(图 22-15 ~ 图 22-24, 表 22-36 ~ 表 22-49)

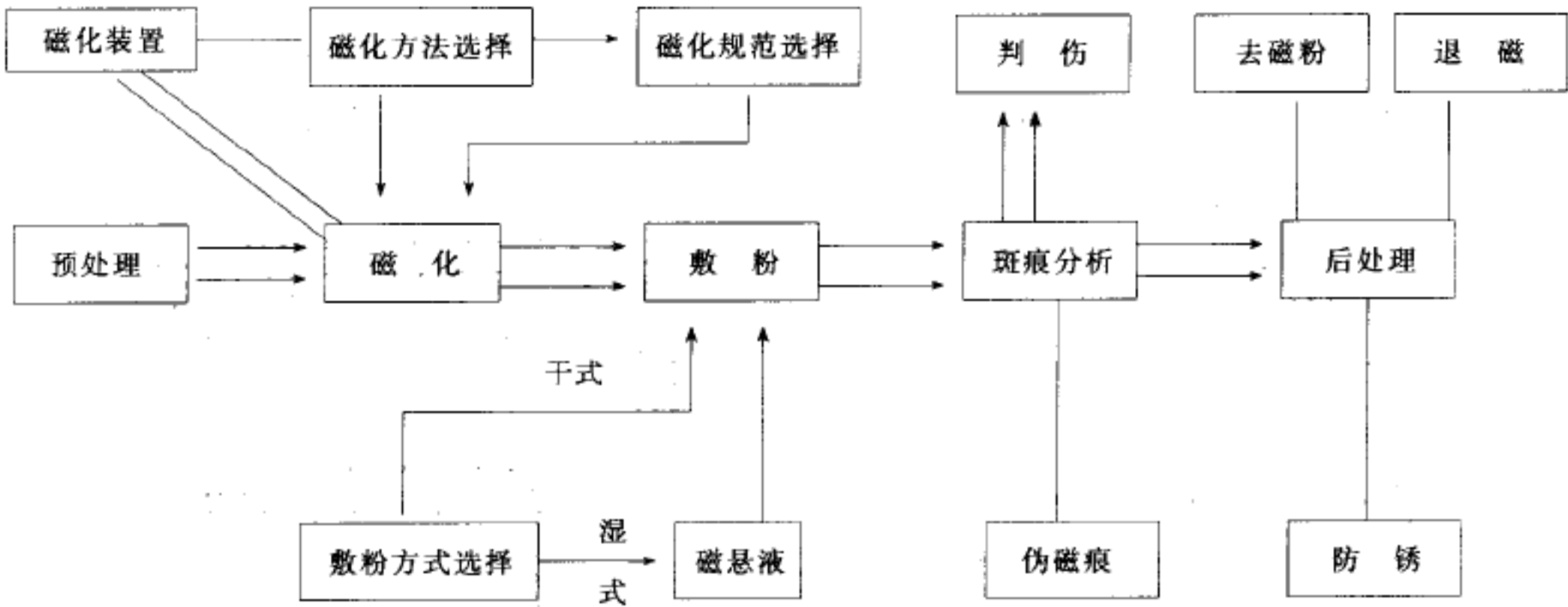


图 22-15 磁粉探伤过程

表 22-36 磁化方法

分 类	名 称	要 点	应 用 特 点
周 向 磁 化	沿工件周 向建立磁场 的方法	轴向通电法 电流直接通过工件	主要用于轴、杆类工件探伤
		中心导体法 电流通过插入工件孔内 的导体或电缆	主要用于管件及有孔形工件探伤
		电极触点法 (支杆法) 利用接触电极使电流通 过工件被检部位	主要用于大型工件、焊缝等的局 部表面探伤,通过触点位置移动可 达到对整个工件探伤的目的
纵 向 磁 化	使磁力线 平行于工件 轴向的磁化 方法	线圈法 用螺管线圈或绕在工件 上的电缆通电磁化	主要用于轴、杆类零件探伤
		电磁铁法(极 间法) 零件置于电磁铁两极 间,局部闭路磁化	主要用于大型工件、焊缝等的探 伤
		磁轭法 磁轭夹住工件,形成闭 路磁化	主要用于中、小工件或较短轴,杆 类工件探伤

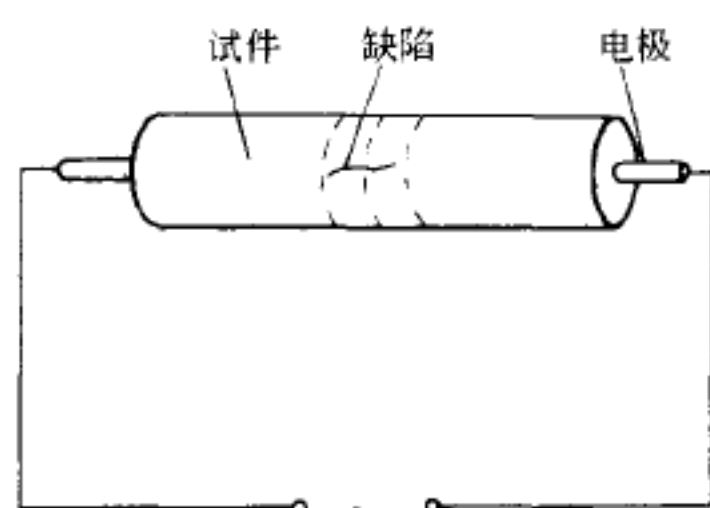


图 22-16 轴向通电磁化法

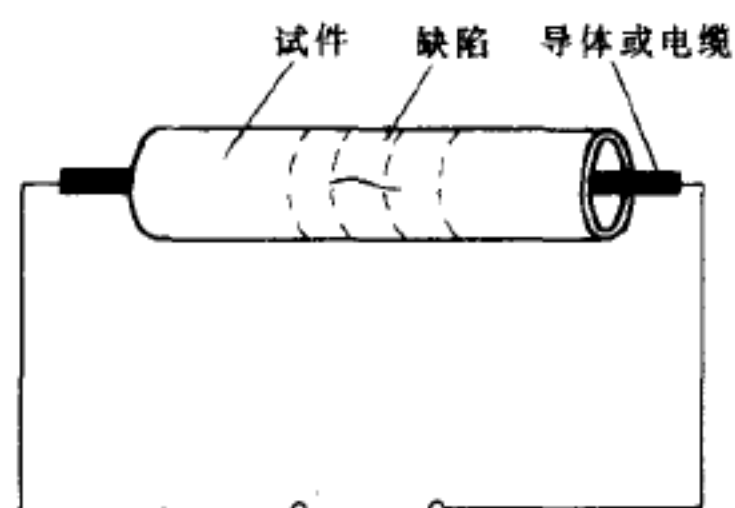


图 22-17 中心导体磁化法

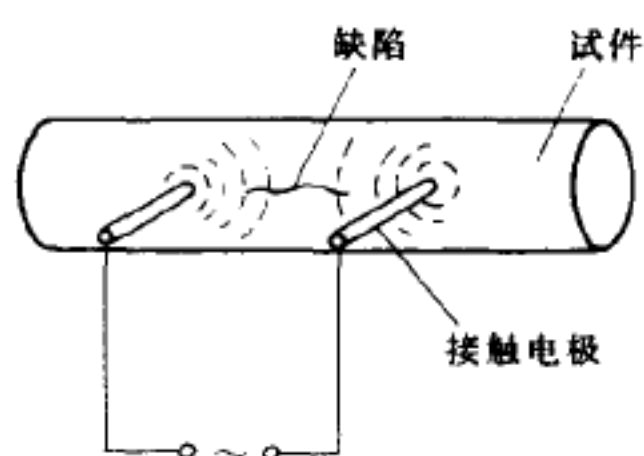


图 22-18 电极触点法(支杆法)

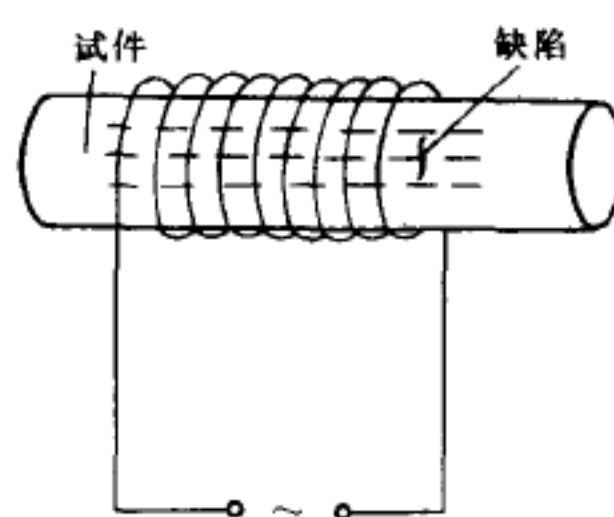


图 22-19 线圈法

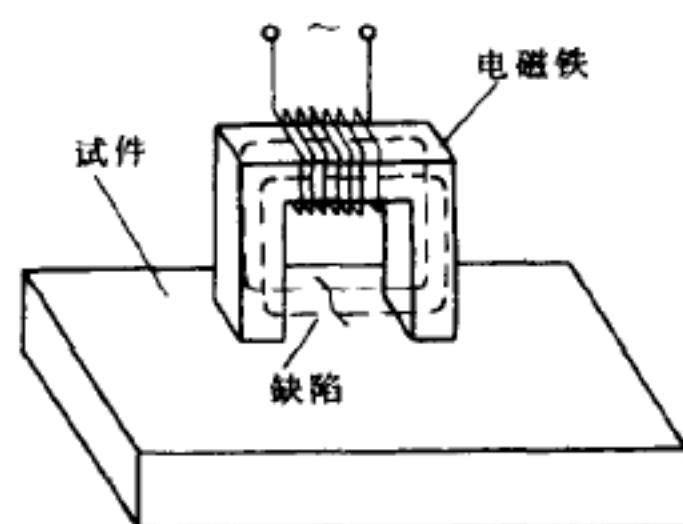


图 22-20 电磁铁法(极间法)

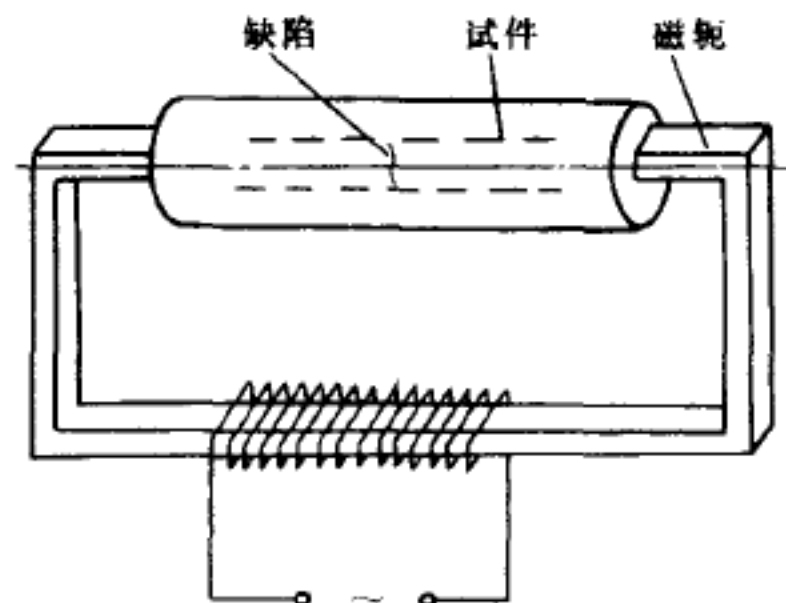


图 22-21 磁轭法

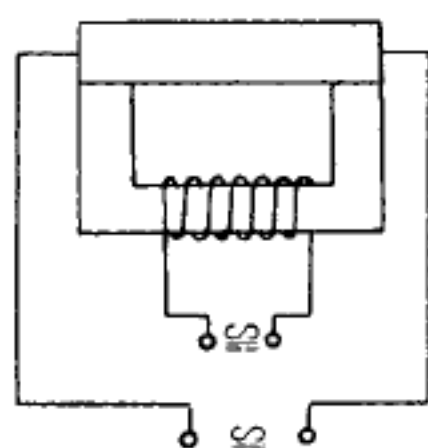


图 22-22 复合磁化(一)

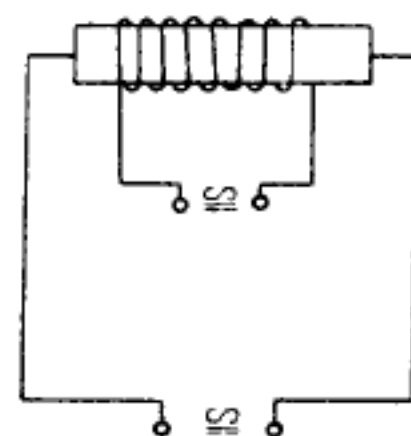


图 22-23 复合磁化(二)

表 22-37 周向磁化规范

磁化方法	标 准	磁 化 规 范		备 注														
轴向通电法	NJ320—1984	连续法: $I = (8 \sim 10) D$ 剩磁法: $I = (20 \sim 30) D$ 直径 < 20 时, $I = 20 D$		I 为电流值(A); D 为零件直径(mm)														
	MIL- I —6868C	31.5 ~ 47.3A/mm, 直径(800 ~ 1200A/in)																
	ASTMA275—1982	3.94 ~ 35.5A/mm, 直径或与电流垂直平面上的最大宽度(100 ~ 900A/in)		直流磁化, 应使用直流或整流电流														
中心导体法 (电流通入零件孔内导体)	MIL- I —6868C	31.5 ~ 47.3A/mm 外径		磁化大压力容器时应通过磁场强度测定确定电流														
	ASTM A275—1982	3.94/mm 内径(100/in)		轴类锻件内孔														
中心导体法 (电流通入零件孔内电缆)	NJ320—1984	连续法: $I = (8 \sim 10) D/N$ 剩磁法: $I = (20 \sim 30) D/N$		软电缆通过大工件内孔: N 为穿过工件内孔之电缆线圈数														
	ASTM A275—1982	外径或截面 $< 127\text{mm}(5\text{in.})$, 23.6 ~ 35.5A/mm。壁厚/匝(600 ~ 900A/in, 壁厚/匝); 外径或截面在 127 ~ 254mm; 15.8 ~ 23.6A/mm, 壁厚/匝(400 ~ 600A/in, 壁厚/匝); 外径或截面 $> 254\text{mm}(10\text{in.})$, 3.94 ~ 15.8A/mm, 壁厚/匝(100 ~ 400A/in, 壁厚/匝)																
电极触点法 (支杆法)	NJ320—1984	<table><tr><th rowspan="2">支杆间距 /mm</th><th colspan="2">磁化电流/A</th></tr><tr><th>截面厚度 ≤ 20</th><th>$> 20/\text{mm}$</th></tr><tr><td>$> 50 \sim 100$</td><td>$> 200 \sim 300$</td><td>$> 300 \sim 400$</td></tr><tr><td>$> 100 \sim 150$</td><td>$> 300 \sim 400$</td><td>$> 400 \sim 600$</td></tr><tr><td>$> 150 \sim 200$</td><td>$> 400 \sim 600$</td><td>$> 600 \sim 800$</td></tr></table>	支杆间距 /mm	磁化电流/A		截面厚度 ≤ 20	$> 20/\text{mm}$	$> 50 \sim 100$	$> 200 \sim 300$	$> 300 \sim 400$	$> 100 \sim 150$	$> 300 \sim 400$	$> 400 \sim 600$	$> 150 \sim 200$	$> 400 \sim 600$	$> 600 \sim 800$	局部磁化大工件	
	支杆间距 /mm	磁化电流/A																
		截面厚度 ≤ 20	$> 20/\text{mm}$															
$> 50 \sim 100$	$> 200 \sim 300$	$> 300 \sim 400$																
$> 100 \sim 150$	$> 300 \sim 400$	$> 400 \sim 600$																
$> 150 \sim 200$	$> 400 \sim 600$	$> 600 \sim 800$																
	JB741—1980	<table><tr><th>工件厚度/mm</th><th>磁化电流/A/间距(mm)</th></tr><tr><td>≥ 20</td><td>40 ~ 50/10</td></tr><tr><td>< 20</td><td>35 ~ 45/10</td></tr></table>	工件厚度/mm	磁化电流/A/间距(mm)	≥ 20	40 ~ 50/10	< 20	35 ~ 45/10	电极触点间距推荐为 80 ~ 200mm									
工件厚度/mm	磁化电流/A/间距(mm)																	
≥ 20	40 ~ 50/10																	
< 20	35 ~ 45/10																	
	ASTM A275—1982	<table><tr><th>工件厚度/mm</th><th>磁化电流/A/间距(mm)</th></tr><tr><td>$< 19\text{mm}(\frac{3}{4}\text{in.})$</td><td>2.95 ~ 3.94</td></tr><tr><td>$\geq 19\text{mm}(\frac{3}{4}\text{in.})$</td><td>3.94 ~ 4.92</td></tr></table>	工件厚度/mm	磁化电流/A/间距(mm)	$< 19\text{mm}(\frac{3}{4}\text{in.})$	2.95 ~ 3.94	$\geq 19\text{mm}(\frac{3}{4}\text{in.})$	3.94 ~ 4.92	触点间距最大 203.2mm (8in.) 不宜小于 76.2mm (3in.)									
工件厚度/mm	磁化电流/A/间距(mm)																	
$< 19\text{mm}(\frac{3}{4}\text{in.})$	2.95 ~ 3.94																	
$\geq 19\text{mm}(\frac{3}{4}\text{in.})$	3.94 ~ 4.92																	

表 22-38 纵向磁化规范

磁化方法	标 准	磁 化 规 范	备 注
线圈法	NJ320—1984	连续法: $L/D \geq 10$, 磁场强度 $\frac{12500}{\pi} \text{ A/m}$, (500e) $2 < L/D < 10$, 磁场强度 $\frac{20000}{\pi} \text{ A/m}$, (800e) $L/D \leq 2$, 磁场强度 $\frac{30000}{\pi} \text{ A/m}$, (1200e) 剩磁法: 有效磁化区域的磁场强度为连续法的三倍线圈纵向磁化时, 线圈的磁动势为 3000 ~ 10000 安匝	L/D 为工件长度与直径之比 线圈磁动势应根据探伤机的结构, 零件形状以及磁路上的磁通损失等选定
	MIL- I —6868C	固定式螺管线圈或绕扎线圈即绕零件缠绕的电缆, 应采用 8000 ~ 10000 安匝	
	ASTM A275—1982	小型锻件: $L/D \geq 4$, $35000/(2 + L/D)$ 安匝 大型锻件: 1200 ~ 4500 安匝	$L/D < 4$ 之小型锻件, 用磁场指示器验证 大型锻件用磁场指示器验证
电磁铁法(极间法)	JB741—1980	交流电磁铁提升力 $\geq 49.1\text{N}(5\text{kgf})$; 直流电或永久磁铁提升力 $\geq 196.2\text{N}(20\text{kgf})$	两磁极间距宜在 80 ~ 160mm
	NJ320—1984	一般用交流电的电磁铁, 在磁极间距为 75 ~ 150mm 时, 其提升力应大于 68.7N(7kgf); 当用直流电时, 其提升力应大于 98.1N(10kgf)	用小型电磁铁磁化零件时, 其磁化电流应根据试验确定

表 22-39 磁悬液配制方法

类 别	成 分	配 制 方 法	应 用 范 围
水悬浮液	甘油三油脂酸肥皂 ^① 15 ~ 20g 磁粉 50 ~ 60g 水 1000mL	先将甘油三油脂酸肥皂放在少量温水中稀释, 然后加入磁粉, 在研钵中研细, 最后加水到 1000mL	检验效果较油悬浮液好, 但零件表面要预先清理脱脂
油悬浮液	1.60% 变压器油 + 40% 煤油, 在 1000mL 悬浮液中含 100g 磁粉 2.1000mL 变压器油中含 50g 磁粉		在油中淬火的零件, 如表面无严重氧化, 可直接用此液检验
荧光磁悬浮液	荧光磁粉: 磁粉 56%; 铁粉 40%; 荧光剂(蒽) 4%; 胶性漆每 100g 混合物中为 40g, 水悬浮液 乳化剂 4% ~ 5% (质量分数) 亚硝酸钠 3% ~ 4% (质量分数) 荧光磁粉在每 100mL 液体中为 15 ~ 20g	各种粉粒的粒度为 3 ~ 5 μm , 先将配好的磁粉用水调制, 加入乳化剂和亚硝酸钠	综合了荧光和磁粉探伤的优点 灵敏度比单纯荧光法高 只能用于铁磁金属

① 亦可用普通肥皂代替, 但均匀性与稳定性差。

表 22-40 荧光磁悬液配方

配 方 1		配 方 2	
成 分	成 分 比 例	成 分	成 分 比 例
水	1000cm ³	水	1000cm ³
乳 化 剂	10g	Op-20(或 Op-10)	0.5%(容积比)
二乙醇胺	5g	亚硝酸钠	5g
亚硝酸钠	5g	荧光磁粉	0.5~2g
荧光磁粉	1~2g	消泡剂	1g
消 泡 剂	1g		

表 22-41 采用电极触点法进行磁粉探伤时的两电极触点间距离和磁化电流规范

零件厚度/mm	(磁化电流/A)/(触点间距/mm)
≥20	(40~50)/10
>20	(35~45)/10

表 22-42 缺陷磁痕的一般特征

缺 陷 名 称	磁 痕 一 般 特 征
裂 纹	清晰而浓密的曲折线状
锻造裂纹	磁痕聚集较浓,呈方向不定的曲线状或锯齿状;近表面锻裂产生不规则弥漫状磁痕,出现部位与工艺有关
热处理裂纹	磁痕明显,浓度较高、呈线状、棱角较多且尾部尖细。多出现在棱角、凹槽、变截面等应力集中部位
磨削裂纹	一般与磨削方向垂直,且成群出现,成网状或细平行线状
铸造裂纹	在应力最大的裂开部位较宽后变细
疲劳裂纹	按中间大,两边对称延伸的线状曲线分布,大多垂直于零件受力方向
焊接裂纹	多弯曲,两端有鱼尾状,焊缝下(近表面)裂纹形成较宽的弥漫状磁痕
白 点	在圆的横断面上等圆周部位呈无规则分布,短柱线状
夹杂(与气孔)	单个或密集点状或片状,与缺陷具体形状相似
发 纹	沿金属流线方向垂直线或微弯曲线状分布。表面发纹磁痕非常细小但轮廓明显,正表面发纹图像不清晰

表 22-43 伪磁痕的一般特征

伪 磁 痕 成 因	伪 磁 痕 一 般 特 征
局部冷作硬化	一般呈较宽带状,线性度较差
截面急剧变化	宽而模糊,分布不紧凑
流 线	沿流线方向成群的平行磁痕,呈不太连续散状,往往因磁化电流过大而致
磁化物层状组织	短、散、宽带状分布
焊缝边缘	吸附不紧密,边缘不清晰
无规则的局部磁化	无规则的局部磁化——“磁写”痕迹,模糊,退磁后可去掉

表 22-44 探伤灵敏度

磁 化 方 法	裂 纹 与 未 焊 透 等		发 纹	
	埋藏深度/mm	宽度/mm	埋藏深度/mm	尺寸/mm
直流电磁铁	≤2.5	0.01~0.2	≤1	宽 0.04~0.3 深 0.05~0.7

(续)

磁化方法	裂纹与未焊透等		发纹	
	埋藏深度/mm	宽度/mm	埋藏深度/mm	尺寸/mm
交流电磁铁	≤1.5		≤0.5	宽 0.04~0.3 深 0.05~0.7
交流电磁铁 (剩磁法)	≤1		≤0.3	宽 0.04~0.3 深 0.05~0.7

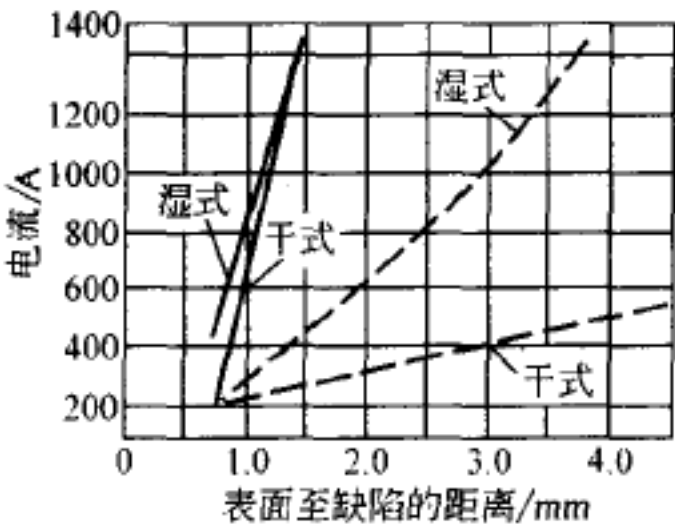


图 22-24 不同形式电流和磁粉情况下的检测灵敏度区别

表 22-45 固定式磁粉探伤机

分类	磁化方式与磁化电流		设备型号与生产厂
	周向磁化	纵向磁化	
1	直接通电法(直流)	开路线圈法(直流)	MO—600(美国)
2	直接通电法(直流)	闭路线圈法(直流)	HFR—6000(日本)
3	直接通电法(交流)	开路线圈法(交流)	TC—2000 TC—6000 TC—9000 TC—12500 (营口仪器厂)
4	直接通电法(交流)	闭路线圈法(直流)	CFW—2000 CFW—2000A CFW—4000 CFW—10000 (上海探伤机厂)

表 22-46 便携式磁粉探伤仪

分类	磁化方式	磁化电流	设备型号	特 点
1	直接通电法(周向磁化)	交流	TC—500 型 CEX—500 型	可探测焊缝或铁磁材料表面缺陷
2	直接通电法(周向磁化)	直流或半波整流	CZB—3000 型 CYD—1 型	可探测焊缝或铁磁材料表面及隐藏较深的缺陷
3	电磁铁磁化法(纵向磁化)	交流	CJX—515 型	可探测焊缝或铁磁材料表面缺陷
4	电磁铁磁化法(纵向磁化)	直流	CEX—500 型	可探测焊缝或铁磁材料表面及隐藏较深的缺陷
5	旋转磁场(各向磁化)	交流	YJ—HB 型	探测焊缝或铁磁材料表面缺陷,效率高

表 22-47 厚度大于 20mm 零件用电极触点法进行焊缝磁粉探伤的磁化电流规范

电极触头距离/mm	磁化电流/A	电极触头距离/mm	磁化电流/A
80	320 ~ 400	150	600 ~ 750
90	360 ~ 450	160	640 ~ 800
100	400 ~ 500	170	680 ~ 850
110	440 ~ 550	180	720 ~ 900
120	480 ~ 600	190	760 ~ 950
130	520 ~ 650	200	800 ~ 1000
140	560 ~ 700		

表 22-48 厚度大于 20mm 零件用电极触点法进行焊缝磁粉探伤的磁化电流规范

电极触头距离/mm	磁化电流/A	电极触头距离/mm	磁化电流/A
80	280 ~ 360	150	525 ~ 675
90	315 ~ 405	160	560 ~ 720
100	350 ~ 450	170	595 ~ 765
110	385 ~ 495	180	630 ~ 810
120	420 ~ 540	190	665 ~ 855
130	455 ~ 585	200	700 ~ 900
140	495 ~ 630		

表 22-49 部分钢材的磁特性参数

材料	热处理规范	剩余磁感应强度 B_r/T	矫顽力 $H_c/A \cdot m^{-1}$
2Cr13	1050℃ 淬火, 650℃ 回火	0.68	800
	730 ~ 780℃ 空冷	0.88	720
38CrA	860℃ 正火, 860℃ 油淬, 530℃ 回火	1.40	960
	850℃ 炉冷	0.31	640
12CrNi3A	材料供应态	1.32	320
	930℃ 渗碳, 800℃ 油淬, 160℃ 回火	0.96	1760
	850℃ 炉冷	0.67	640
	860℃ 淬火, 780℃ 淬火, 160℃ 回火	0.98	1600
18Cr2Ni4WA	960℃ 正火, 850℃ 油淬, 535℃ 回火	1.00	1120
	960℃ 空冷, 850℃ 空冷, 160℃ 回火	0.96	2400
	900℃ 空冷	0.61	1840
38CrMoAlA	940℃ 油淬, 600℃ 回火	1.25	960
	850℃ 炉冷	0.43	800
40CrNiMoA	850℃ 油淬, 600℃ 回火	1.56	1280
	850℃ 炉冷	0.78	800
	860℃ 油淬, 200℃ 回火	1.00	2480
Cr17Ni2	1030℃ 油淬, 530℃ 回火	0.75	2160
	680℃ 炉冷	0.76	1440
GC-11	920℃ 正火, 350℃ 回火	0.63	1440
	轧后 680℃ 回火	0.82	640
1Cr12Ni2WMoV	中模锻	0.69	1360
	1000℃ 油淬, 590℃ 回火	0.76	1400
GCr15	840℃ 油淬, 190℃ 回火	0.75	3120
25	冷拉状态	0.61	860
	900℃ 正火	1.20	320
	850℃ 空冷	0.23	240

(续)

材料	热处理规范	剩余磁感应强度 B_r/T	矫顽力 $H_c/A \cdot m^{-1}$
45	850℃正火	1.20	400
	850℃空冷	0.70	640
	830℃油淬,450~600℃回火	1.40	800

2. 涡流探伤(图 22-25,表 22-50)

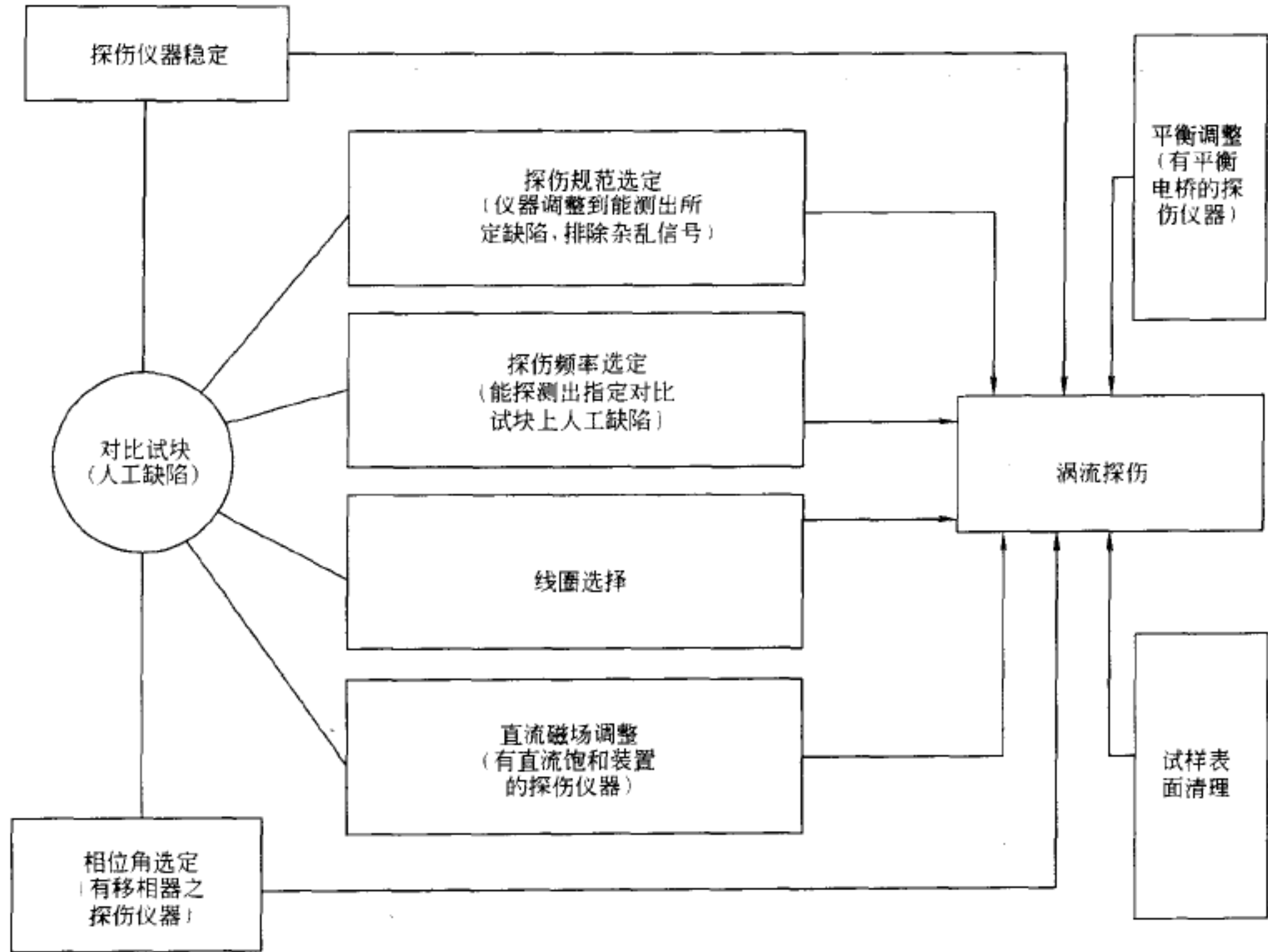


图 22-25 涡流探伤操作程序

表 22-50 涡流检测线圈分类

穿过式线圈	套在线材、棒材、管材等被检件外径上
插入式线圈	插到被检件内孔或管子内作内壁探测
探头式线圈	放在板材、钢锭和棒材等被检件表面的线圈,特别适用于局部检测
叉式线圈	薄板、箔、金属化纸和类似的导电材料等被检件通过有两个臂的线圈
旋转式探头	在管材、棒材外壁旋转的线圈或在管子内壁或钻孔中旋转的线圈

3. 渗透法探伤(表 22-51 ~ 表 22-56)

表 22-51 渗透检验方法的选择

检 查 对 象	渗透检验方法					
	水洗型 荧光法	后乳化型 荧光法	溶剂清洗型 荧光法	水洗型 着色法	后乳化型 着色法	溶剂清洗型 着色法
细小裂纹、宽而浅裂纹、表面粗糙度低的零件		○			○	○
疲劳裂纹、磨削裂纹,其他 细小裂纹		○	○			○

(续)

检 查 对 象	渗透检验方法					
	水洗型 荧光法	后乳化型 荧光法	溶剂清洗型 荧光法	水洗型 着色法	后乳化型 着色法	溶剂清洗型 着色法
小型零件的批量检查	○			○		○
大型工件的局部检查			○			○
粗糙面检查	○			○		
没有暗室的场合				○	○	○
没有水电的场合						○

表 22-52 常用渗透探伤剂配方

1. 常用着色液配方						
配方编号	配制顺序	成 分	成分比例(%)	常用清洗剂或 乳化剂编号	显象剂编号	颜色
1	1	苏丹红 IV	1g/100mL	丙 酮	1 号	红
	2	航空滑油(HP—8)	5			
	3	苯	95			
2	1	苏丹红 IV	1g/100mL	丙 酮	1 号	红
	2	苯	20			
	3	煤 油	80			
3	1	苏丹红 IV	1g/100mL	丙 酮 { 煤 油 30 变压器油 70 1 号	1 号 3 号	红
	2	硝 基 苯	10			
	3	苯	20			
	4	煤 油	70			
4	1	苏丹红 IV	1g/100mL	丙 酮	1 号	红
	2	航空滑油(HP—8)	5			
	3	甲基异丁基酮	95			
5	1	水扬酸甲脂	30	丙 酮 { 煤 油 变压器油 1 号	1 号 4 号 5 号	红
	2	煤 油	60			
	3	松 节 油	10			
	4	苏 丹 IV	1g/100mL			
6	1	128 烛红	0.7g/100mL	{ 变压器油 30 H(HP—8) 煤 油 70 1 号 2 号	1 号 3 号	红
	2	水扬酸甲脂	25			
	3	苯甲酸甲脂	10			
	4	松 节 油	15			
	5	煤 油	50			
7	1	乙 酸 乙 脂	5	8 号	6 号	红
	2	航 空 滑 油	60			
	3	松 节 油	5			
	4	变 压 器 油	20			
	5	丁 酸 丁 脂	10			
	6	苏 丹 红 IV	0.8g/100mL			
8	1	水	100	水	8 号 1 号、2 号	红
	2	氯 化 钠	微量			
	3	大 红	0.8g/100mL			
	4	表面活性剂	1g/100mL			
9	1	二甲基萘	15	水	7 号	红
	2	α -甲基萘	20			
	3	200* 溶剂汽油	52			
	4	萘	1g/100mL			
	5	土混—60	5			
	6	三乙醇胺油酸皂	8			
	7	油 溶 红	1.2g/100mL			

(续)

配方编号	配制顺序	成 分	成分比例(%)	常用清洗剂或 乳化剂编号	显象剂编号	颜色
10	1	苏丹红 IV	1g/100mL	丙 酮	1.3	红
	2	变 压 器 油	5			
	3	煤 油	75			
	4	苯	20			
11	1	甲基紫	1.2g/100mL	丙 酮	1 号	紫
	2	苯	25			
	3	油 酸	10			
	4	煤 油	60			
	5	硝 基 苯	5			
12	1	128 号烛红	1.2g/100mL	丙 酮	1 号	红
	2	苯	1g/100mL			
	3	水杨酸甲脂	50			
	4	二 甲 苯	20			
	5	煤 油	30			
13	1	油 溶 橙	2g/100mL	丙 酮	1 号 3 号	橙黄
	2	硝 基 苯	10			
	3	苯	20			
	4	煤 油	70			
14	1	油 溶 棕	1g/100mL	丙 酮	1 号 3 号	棕
	2	硝 基 苯	10			
	3	苯	20			
	4	煤 油	70			

注:以上配方中:苏丹红Ⅳ号,大红,油溶橙(棕)[又叫:塞列斯橙(棕)]等均为着色颜料。

苯、煤油、汽油、水、水杨酸甲脂、苯甲酸甲脂、二甲基萘和 α -甲基萘等常作溶剂和渗透剂,最常用的渗透剂是煤油、汽油、航空滑油、硝基苯。松节油及萘多为助溶剂,并调节粘度。土混和三乙醇胺油酸皂,冲洗时起乳化作用

2. 常用清洗剂配方

配方编号	成 分	成分比例(%)	备 注
1	工业丙酮	10	溶剂型去色剂, 可用干洗法(即不用水只用棉纱蘸少许 擦干即可)
	工业乙醇	40	
	乳化剂(OP-10)	50	
2	工业丙酮	35	乳化型去色剂 去色时先乳化,而后用 50~60℃ 热水冲 洗
	油 酸	5	
	乳化剂(平平加)	60	
3	工业乙醇	100	溶剂型去色剂 水溶后加热,互溶成膏状物可用
	乳化剂(平平加)	120g/100mL	
4	煤 油	30	乳化型去色剂 可用于干洗法
	变压器油	70	

注:1. 对水洗性渗透液去色时可直接用水冲洗

2. 对油溶性和溶剂性渗透液去色之前,需首先进行乳化和溶解处理,而后再水洗

3. 可用与渗透液有一定互溶程度的低沸点溶剂(如乙醇、丙酮等)和乳化剂(主要是煤油、变压器油等)

(续)

3. 常用着色显象剂配方

配方编号	成 分	成分比例(%)	备 注
1	氧化锌白 苯 火棉胶(5%) 丙 酮	5g/100mL 20 70 10	适用于浸、刷、喷 喷涂时应再加入 40 ~ 50mL 丙酮稀释
2	丙 酮 醋酸纤维素 氧化锌白	100 1g/100mL 5g/100mL	适用于喷、涂 醋酸纤维素在丙酮中完全溶解后再加 锌白
3	氧化锌白 工业丙酮 PDB 稀释剂 火棉胶(5%)	10g/100mL 65 20 15	适用于成批喷涂法,生产中成批检验用
4	油溶颜料锌白 苯 火棉胶(5%) 工业丙酮	5g/100mL 20 20 60	将锌白溶于苯中,再倒火棉与丙酮搅匀
5	过氯乙烯树脂 工业丙酮 二甲苯 油溶性锌白	30g/100mL 60 40 5g/100mL	适用于剥膜复印法 树脂倒入丙酮中充分溶解后加二甲苯, 15min 后再加锌白搅均
6	火棉胶(5%) 丙 酮 乙 醇 二氧化钛	45 40 15 5g/100mL	将二氧化钛溶于乙醇而后加入丙酮与 火棉胶
7	氧化锌白 120 号汽油 乙 醇 火 棉 胶 异 丙 醇	5g/100mL 15 50 15 20	此配方挥发性较差,低温时干得慢
8	水 表面活性剂 糊 精 白色粉末	100mL 0.01 ~ 0.1g 0.5 ~ 0.7g 6g	此配方是水基显象剂,水是溶剂,糊精 是限制剂
9	氧化锌白 工业丙酮 PDB 稀释剂 火棉胶(5%)	5g/100mL 40 10 50	适用于浸泡法,如要喷涂需加入丙酮 40% ~ 60%

注:1. ZnO、TiO₂、白色粉末(粉笔灰), MgO 为吸附剂

2. 丙酮、苯、二甲苯、水等为悬浮白色粉末的溶剂

3. 火棉胶、醋酸纤维素、过氯乙烯树脂、糊精等为限制剂

(续)

4. 常用荧光渗透剂配方

配方编号	配制顺序	成 分	成分比例(%)	备 注
1	1 2	航空润滑油 煤 油	15 } 85 } 体积	俄罗斯配方 滑油价贵, 灵敏度低,0.01mm
2 Z-100 型	1 2	煤 油 二 萘 油	90 } 10 } 体积	沈阳铸造所配方 灵敏度:0.002 ~ 0.001mm
3 Z-101 型	1 2	煤 油 萘 油	85 } 15 } 体积	沈阳铸造所配方 灵敏度:0.002mm
4 P-100	1 2 3 4 5	二 甲 苯 (邻)苯二甲酸二丁脂 石 油 醚 拜尔荧光黄 S101 塑料增白剂	25 12.5 62.5 0.2g 0.1g	上海锅炉厂配方 拜尔荧光黄须进口,灵敏度为: 0.001mm
5 P-102	1 2 3 4 5	二 甲 苯 (邻)苯二甲酸二丁脂 石 油 醚 拜尔荧光黄 S101 塑料增白剂	66.5 28.5 5 2.5g/10mL 1.6g/10mL	上海锅炉厂配方 二甲苯为基本溶剂, 增加了荧光黄和增白剂的溶量, 发光亮度大

注: 1. 以上配方按配制顺序配制, 在 15 ~ 38℃ 使用

2. 2* 3* 配方配制时先将二萘油或萘油加热到熔融状态后倒入煤油中搅拌均匀, 使其充分溶解后再冷却至 10℃ 滤去杂质即可使用

3. 硝酸、铬酸会使荧光质失效, 因此探伤时应避免接触

5. 常用荧光显像剂配方

配方编号	配方顺序	成 分	成分比例(%)	备 注
1 号	1 2	酒 精 氧 化 镁	100mL 5g	适用于较光滑表面与 Z-100、Z-101 配用混合后纱布过滤
2 号	1 2 3	丙 酮 醋酸纤维素 氧 化 镁	100mL 1g 5g	适用于较粗糙表面 其他同上
3 号 D-100	1 2 3 4 5 6	火 棉 胶 丙 酮 无 水 酒 精 苯 二 甲 苯 锌 白	55 } 16 } 14 } mL 9 } 6 } 5g	
4 号	1 2 3 4	火 棉 胶 丙 酮 二 甲 苯 油质锌白	35 50 15 5g	适用于较光滑表面

表 22-53 几种固体荧光物质的性质

荧光物质	激活剂	发 光 颜 色	发光波带最大值/nm	激发光谱/nm
CaS	Mn	橙 黄 色	600	接近紫外线, 在 420 以下
CaS	Mn	绿 色	510	接近紫外线, 在 420 以下
CaS	Ni	红 色	780	在 420 以下
CaS	Ni	蓝 色	475	在 420 以下
ZnS	Mn	黄 绿 色	555	在 420 以下
ZnS	Cu	蓝 绿 色	535	在 420 以下
ZnS	—	浅 蓝 色	465	在 440 以下
ZnS	Ag	蓝 色	445	在 440 以下
ZnS	Mn	橙 黄 色	585	在 450 以下
CaWO ₄	(Pb)	蓝 色	440	不超过 300
CaWO ₄	—	青 白 色		不超过 300
MgWO ₄	—	青 白 色	480	不超过 320
(Zn-Cd) S	Ag	当浓度增大时由蓝到红各色		
(Zn + Cd) S	Cu	由蓝到红各色	590	接近紫外线, 在 460 以下

表 22-54 液体荧光物质特性

液 体 发 光 物 质	发 光 颜 色	发光波段最大值/nm
煤油	浅 蓝	400 ~ 240
矿物油	浅 蓝	400 ~ 240
25% 航空机油与煤油的混合油, 加热到 50 ~ 90℃, 比例为 1:2	浅 蓝	约 460
变压器油和煤油的混合油, 比例为 1:2 或 1:3, 在混合后的总量中加 5% 葱油	亮 青 色	约 500
苯甲酸苯甲酯 (用萤光黄饱和) 100% 中加入 PEB 增白剂 0.3% g	绿 色	

表 22-55 渗透检验的操作程序

渗 透 检 验 方 法		显 像 剂	操 作 程 序
荧光法	水洗型	干 式	预清洗—渗透—清洗—干燥—显像—检查
		湿 式	预清洗—渗透—清洗—显像—干燥—检查
	后乳化型	干 式	预清洗—渗透—乳化—清洗—干燥—显像—检查
		湿 式	预清洗—渗透—乳化—清洗—显像—干燥—检查
着 色 法			预清洗—干燥—渗透—清洗—干燥—显像—检查

表 22-56 推荐的渗透和显象时间

材 料	状 态	缺 陷 类 型	渗透时间/min	显象时间/min
铝, 镁, 钢, 黄铜, 青铜	铸造-铸件和焊缝	冷隔、气孔、未焊合裂纹(各种状态)	5	7
钛及高温合金	锻造-挤压件、锻件板材	折叠、裂纹(各种状态)	10	7
硬质合金, 工具钢		未熔合、气孔、裂纹	5	7
塑料	各种状态	裂纹	5	7
玻璃	各种状态	裂纹	5	7
陶瓷	各种状态	裂纹	5	7

注: 1. 适用的温度范围为 15 ~ 50℃。

2. 所给渗透和显象时间均为最少推荐值。

3. (渗透剂在工件上的渗透时间应按制造厂推荐意见, 以达充分渗透), 最长渗透时间为 60min。

4. 显象时间为最小推荐值。干式, 显象剂施加结束后开始计算; 湿式, 在干燥后开始计算。

5. 排液时间应包括在渗透时间内。

4. 超声波探伤 (表 22-57 ~ 表 22-66, 图 22-26 ~ 图 22-29)

表 22-57 超声波探伤分类

按原理分类	连续探伤 (共振式、调频式及穿透式) 与脉冲探伤
按显示方式分类	声响显示与光电显示 (A 型、B 型、C 型与 3D 型)
按探头数分类	单探头、双探头及多探头探伤
按接触方式分类	直接接触法与水浸法探伤

表 22-58 按显示方法分类

类 型	特 点
A 型	声波在工件中传播遇到缺陷或底面就产生反射而被探头接收, 超声波信号被转变成电信号并经放大后, 在荧光屏上以脉冲信号显示出来
B 型	把反射波作为辉度调制信号, 缺陷以亮点表示
C 型	缺陷以亮点表示, 可显示工件内部缺陷的平面图像
3D 型	把 B、C 型显示相结合, 产生一个准三维的投影图像, 能表示缺陷的形状、大小及空间位置

表 22-59 脉冲反射法分类

探 伤 方 法	波 型	主 要 用 途
垂直探伤法	纵 波	铸件、锻件及轧件等的内部缺陷检测, 有时也用于焊缝及管件内部缺陷检测
斜角探伤法	横 波	焊缝及管件等的内部缺陷检测
表面波探伤法	表面波	表面缺陷检测
板波探伤法	板 波	薄板缺陷检测

表 22-60 超声波探伤方法比较

探 伤 方 法	显 示 缺 陷 的 方 式	优、缺 点
脉冲反射法	被检物中传播的超声波脉冲在完整部位与缺陷的界面产生反射波, 用示波管显示	仪器轻便, 检验迅速, 发现裂纹灵敏度高 直观性差, 要求工件有较高表面质量, 对检验人员技术要求高
连续发射法 (投影法)	向被检物发射的超声波遇到缺陷后被界面反射回去, 在缺陷背后形成声影	可检测的金属厚度大; 对工件表面质量要求稍差; 采用双探头, 操作较复杂; 缺陷尺寸小于波长则无法检出
超声波显像法 (超声波显微镜)	声影透过声透镜及图像变换器显示出内部缺陷图像	直观性好; 分辨力差; 设备较复杂, 操作不便

表 22-61 耦合技术与耦合剂

耦合方法	耦 合 特 点	常 用 耦 合 剂	备 注
直接接触法	探头与试件探测面之间涂有很薄的耦合剂层	低粗糙度水平探测面	机油 粘度较大的机油或水稀释甘油 甘油或水玻璃
		倾斜、垂直、底面探测面	
		粗糙表面或曲面	
间接接触法	探头与试件探测面间填加粘度较大的耦合剂或采用多层介质耦合技术	透声性能较好的耦合剂 (甘油或水玻璃), 浆糊	主要用于探测面粗糙, 低精度的粗探伤
液浸法	探头与试件探测面之间充满液体, 而且液层较大	水	探测面粗糙程度对探伤结果影响小; 操作较复杂, 需专用设备; 波束指向性较差

表 22-62 常用耦合剂声阻抗

耦合剂种类	声阻抗/ $10^7 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$	耦合剂种类	声阻抗/ $10^7 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$
水 玻 璃	40	水	1.5
甘 油	2.4	马 达 油	1.3
CMC5%水溶液	1.6		

表 22-63 选用探伤频率的一些规定

标 准	探 测 频 率 的 选 用	适 用 条 件
JB1152—1981	一般选用 2.5MHz, 板厚较薄时可采用 5MHz	单斜探头, 对接处厚度为 8 ~ 120mm 的锅炉和压力容器焊接探伤
ASTM A388—80	直射波检验宜用 2.25MHz, 对于粗晶奥氏体材料和长距离探测最好用 1MHz, 在很多情况下甚至可能采用 0.4MHz, 为了得到更好的分辨力、穿透力或缺陷检测能力, 也可采用其他频率 斜射波检验 (环形和空心锻件), 除了因为壁厚, 外径内径比值或其他几何形状而得不到校准的结果以外, 应采用 1MHz 的 45°斜探头	大型锻件探伤
NDIS 2411—1980	垂直探伤, 原则上使用 1MHz、2MHz (或 2.5MHz), 但近距离探伤时, 可采用 5MHz 或 4MHz 斜射法探伤, 原则上使用 1MHz、2MHz (或 2.25MHz)	厚度 100mm 以上碳钢低合金钢锻件
JISZ 2344—1978	原则上如下所列, 其中加括号的尽量不要采用: 0.4、(0.5)、1、2、(2.25)、(3)、(4)、5、(6)、10、(15) 探伤时考虑到有关因素从上列各值中选择探伤频率 不论垂直法、斜射法或水浸法, 通常大多采用 1 ~ 5MHz	金属材料
ANSI/ASTM A745—1977	实际探伤时, 按下列原则确定检验频率: 1. 标称探测频率为 2 ~ 5MHz, 然而该频率应用常因衰减而受限制 2. 通常采用 1MHz 3. 必要时也可采用 0.5MHz 或更低 (经协商)	奥氏体钢锻件, 直射法, 斜射法或两者兼用
JIS Z 3060—1975	板厚 < 75mm, 可采用 5 或 2 (或 2.5) MHz 板厚 > 75mm, 2 (2.25) MHz	钢的焊缝

表 22-64 超声波探伤缺陷定量方法

分 类	方 法 名 称	方 法 要 点	应 用 特 点
波高定量法	缺陷回波高度法	以缺陷回波高度 (绝对值法) 或缺陷回波高度与屏高 (饱和点高度) 之比 (相对值法) 表示缺陷大小	不用试块、缺陷大小及探伤灵敏度均可在工件上确定, 操作方便; F/B 等比值不受探测面状态和耦合条件等的影响, 但随灵敏度、探头尺寸与频率、缺陷测距等的变化而变化 仪器垂直线性良好时, 距离一波幅曲线可直接绘制在荧光屏上, 可直接读出缺陷大小; 仪器垂直线性不佳时, 则利用衰减器读数表示相对波高制作距离——波幅曲线
	底波高度百分比法	用缺陷回波与同时显示的试件底面回波高度之比 (F/B) 或缺陷回波与无缺陷部位底面回波高度之比 (F/B_0) 表示缺陷大小	
	距离波幅曲线法	用算法或实测法绘制的距离-波幅 (dB) 曲线表达反射波高度随距离的变化 (反射体一定时), 该曲线一般由定量线, 测长线和判废线组成	

(续)

分 类	方 法 名 称	方 法 要 点	应 用 特 点
当量定量法	当量试块比较法	相同测试条件下, 缺陷回波与同声程的人工缺陷试块反射波高相同, 则该人工缺陷尺寸即为缺陷当量	<p>一般用于缺陷尺寸小于声束截面的场合</p> <p>方法直观易懂, 当量概念明确</p> <p>试块比较法需制作大量人工缺陷试块, 目前已很少使用</p> <p>AVG 法克服了需用大量试块的缺点, 但限于测距大于三倍近场长度缺陷, 且要求试件截面尺寸大于声束</p>
	AVG 曲线法	预先利用算法或实测法制作“标准化距离 A , 标准化回波高度 V 及缺陷标准化尺寸 G 关系曲线”(AVG), 按测得的缺陷距离及回波高度即可由 AVG 曲线确定缺陷当量值	
探头移动定量法	相对灵敏度测长法	<p>使缺陷回波最大值为基准值, 将其增益 6dB, 使缺陷回波再恢复到基准值的探头移动距离即为“缺陷指示长度”——6dB 测长法, 若增益为 10dB、12dB 等则称为 10dB 法及 12dB 法等</p> <p>从缺陷回波高度(最大值)开始到回波高度降低一半为止的探头移动距离作为缺陷指示长度——半波高度法</p>	<p>适用于缺陷尺寸大于声束截面的场合</p> <p>相对灵敏度法以缺陷波高为基准, 在测量不同长度缺陷时灵敏度相应有所变化, 增益 dB 值愈大, 愈能将短缺陷评价为长缺陷</p> <p>6dB 法得到较普遍应用</p> <p>半波高法与 6dB 法实质相同, 半波高法操作简便, 但对于垂直线性误差较大仪器宜用 6dB 法</p>
	绝对灵敏度测长法	在仪器灵敏度一定的情况下, 缺陷回波高度降到规定位置时的探头移动距离作为“缺陷指示长度”	

表 22-65 几种便携式超声波探伤仪的技术参数

型号	探测范围	工作频率 /MHz	脉波移位 /mm	垂直线性误差 (%)	水平线性误差 (%)	特点
LA-1	10 ~ 5000	0.5 ~ 10				单/双探头
CTS-22A	10 ~ 5000	10	400			交/直流供电
CTS-2200	10 ~ 5000	0.4 ~ 10	≥ 800	≤ 3	≤ 1	
CTS-2000	0 ~ 5000	0.5 ~ 4/0.8 ~ 8/2 ~ 20	- 10 ~ 1000			
USD10NF	0 ~ 10000	0.4 ~ 20	≤ 10000			

表 22-66 A 型脉冲反射式超声波探伤仪主要性能水平分级

序号	项 目	合格品	一等品	优等品	备注
1	探伤灵敏度余量	使用晶片直径 $\leq 20\text{mm}$ 的直探头, 在 2.5MHz 工作频率下, 能发现 $\phi 70\text{mm} \times 225\text{mm}$ 标准试块, 距表面深度为 200mm 的 ϕ_2 平底孔, 在满足本规定的电噪声电平的情况下, 其反射波高度为垂直刻度的 100% 时, 增益余量 $\geq 30\text{dB}$	增益余量 $\geq 36\text{dB}$	增益余量 $\geq 46\text{dB}$	
2	分辨力	使用晶片直径 $\leq \phi 20\text{mm}$ 的直探头, 在 2.5MHz 的频率下, 其分辨力 x 值 $\geq 15\text{dB}$	$x \geq 18\text{dB}$	$x \geq 22\text{dB}$	
3	盲区	在一定灵敏度(与灵敏度测试条件相同), 能发现距表面距离 $\leq 25\text{mm}$ 的 $\phi 2$ 平底孔, 其反射波幅不小于满刻度的 50%, 其前沿和始波后沿相交的高点不大于 10%	$\leq 20\text{mm}$	$\leq 15\text{mm}$	

(续)

序号	项 目	合格品	一等品	优等品	备注
4	垂直线性误差	≤8%	≤6%	≤5%	
5	动态范围	≥24dB	≥30dB	≥30dB	
6	水平线性误差	≤2%	≤1%	≤1%	
7	衰减器衰减范围	≥60dB	≥80dB	≥80dB	
	衰减器衰减精度	每 12dB ± 1.5dB	每 12dB ± 1.0dB	每 12dB ± 0.5dB	
8	回波频率误差	实际	实际	≤ 标称频率的 15%	
9	电噪声电平	≤8%	≤6%	≤4%	
10	垂直极限	不少于示波屏有效垂直高度的 80%	不少于示波屏有效垂直高度的 80%	不少于示波屏有效垂直高度的 80%	
11	垂直线性范围	为垂直刻度的 12% ~ 100%	5% ~ 100%	5% ~ 100%	
12	水平极限	超过满刻度的 10%	超过满刻度的 15%	超过满刻度的 15%	
13	连续运行可靠性	在室温下通电 4h, 允许灵敏度变化 ≤ ± 2dB, 允许深度变化小于满刻度的 2%, 其他保持合格品指标	灵敏度变化 < ± 1.5dB 深度变化小于 2%, 其他保持一等品指标	灵敏度变化 ≤ 1dB, 深度变化小于 2%, 其他保持优等品指标	每小时观察一次
14	探伤深度档级	最小档级 ≤ 100mm, 各档应能连续复盖	最小档级 ≤ 100mm, 各档应能连续复盖	最小档级 ≤ 100mm, 各档应能连续复盖	
15	耐压	电源进线与机壳之间 50Hz、750V, 1min, 无闪烁现象	电源进线与机壳之间 50Hz、750V, 1 分钟、无闪烁现象	电源进线与机壳之间 50Hz、750V、1min、无闪烁现象	
16	电源电压波动 ± 10% 时的灵敏度变化	≤ ± 2dB	≤ ± 1.5dB	≤ ± 1dB	
17	重量 (体积)	实际	实际	同国际同类仪器水平相近	
18	耗电量	实际	实际	同国际同类仪器水平相近	

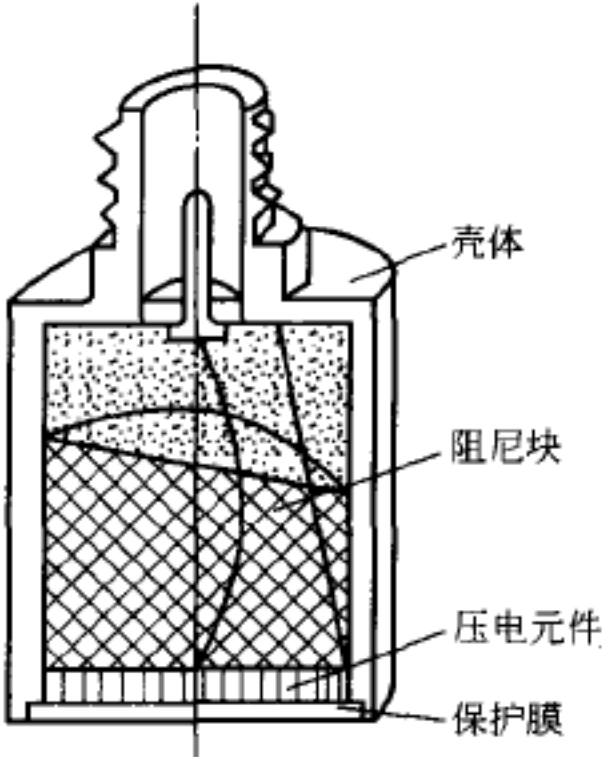


图 22-26 直探头的结构

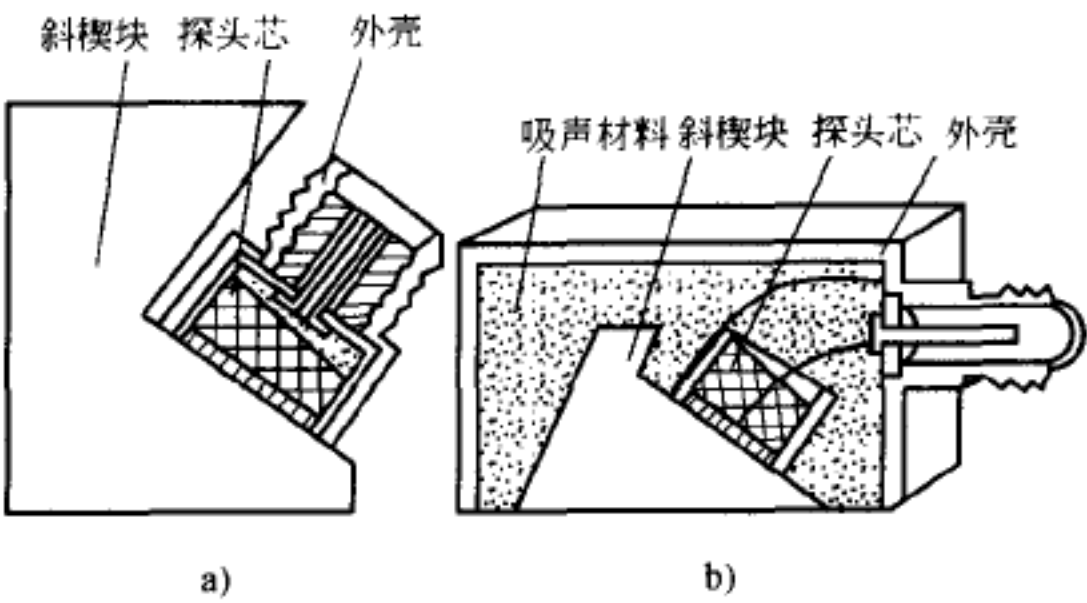


图 22-27 斜探头的结构
a) 有机玻璃斜探头 b) 金属壳斜探头

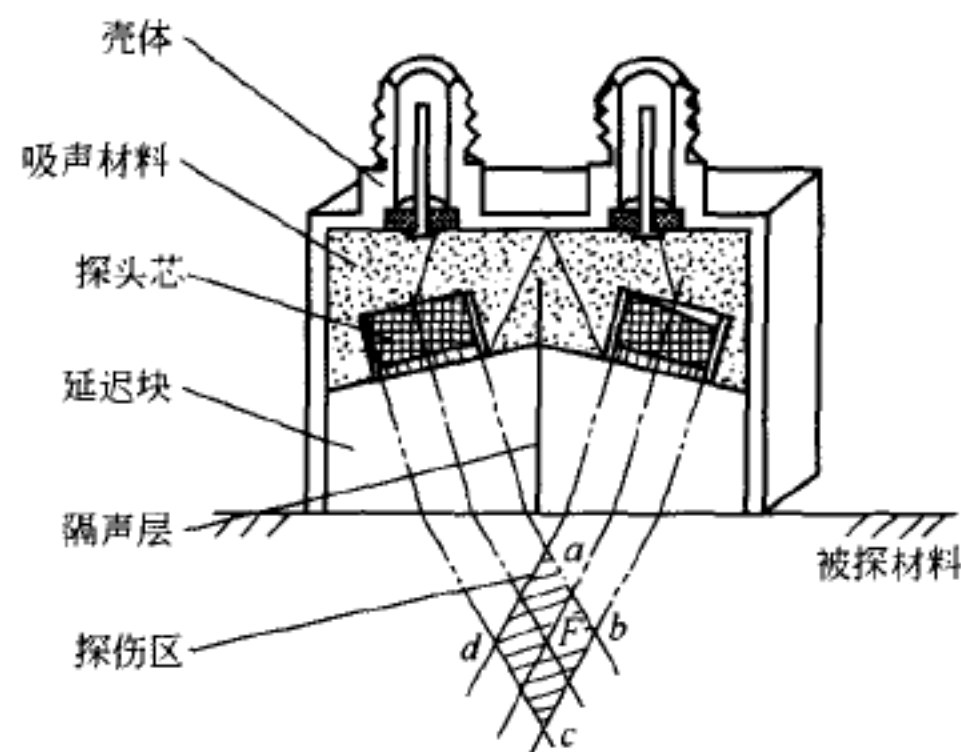


图 22-28 联合双探头的结构

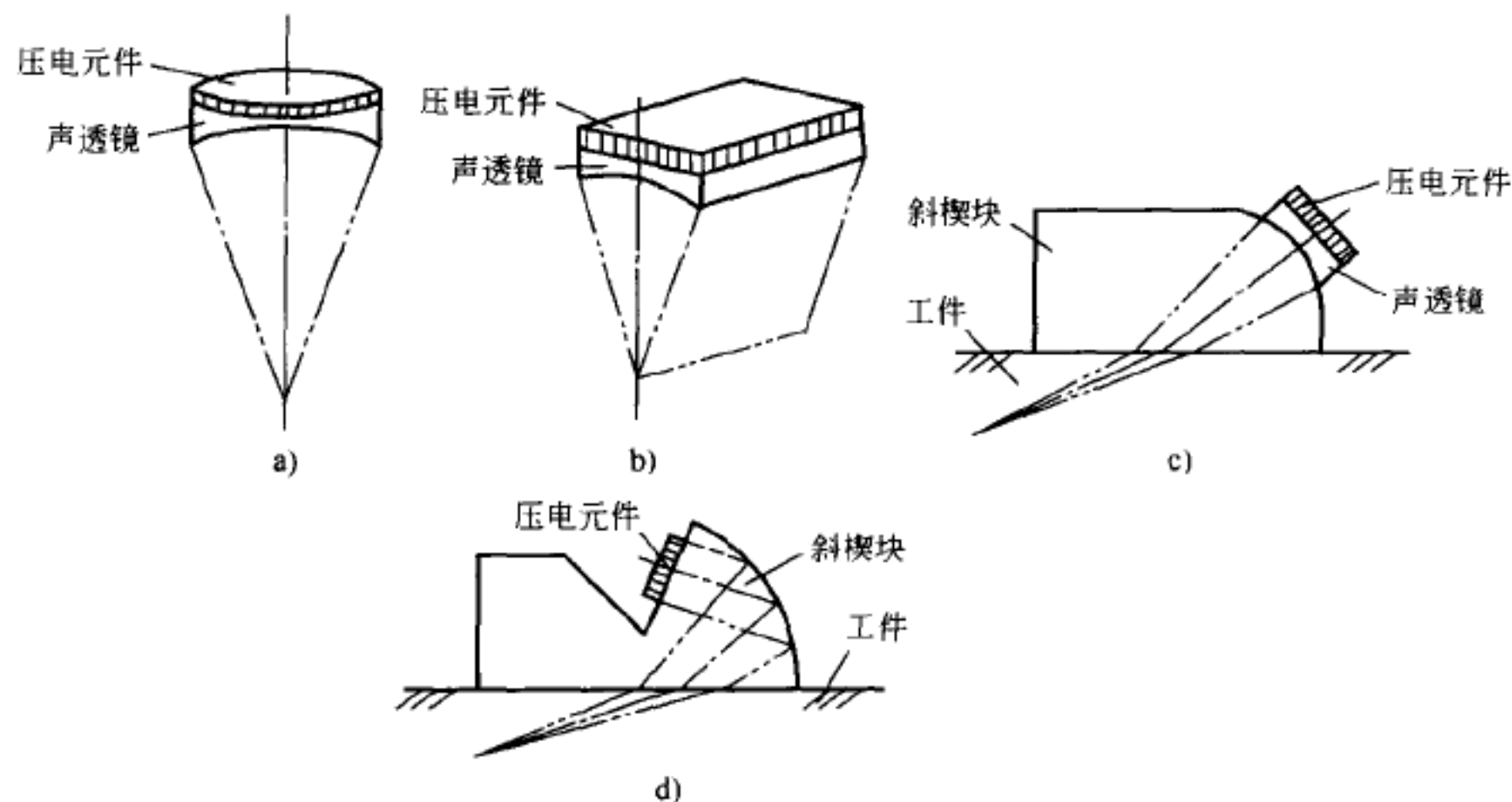


图 22-29 聚焦探头的几种类型

5.X 射线探伤（表 22-67 ~ 表 22-82、图 22-30）

表 22-67 国产携带式 X 射线机主要性能及技术规范（一）

序号	项 目		技 术 数 据				
			TX—1005	TX—1505	TX—2005	TX—2505	TX—3005
1	输 入	电压/V	220	220	220	220	220
		周率/Hz	50	50	50	50	50
		相数	单相	单相	单相	单相	单相
		最大容量	1KVA	1.2KVA	1.5KVA	1.8KVA	2.5KVA
2	输 出	X 射线管两端高压峰值 (KVP)	100	150	200	250	300
		阳极电流 (平均值) /mA	5	5	5	5	5
3	射 线 管	型号	3BEYI—100, 5mA	X1505	X2005	X2505	X3005
		焦点面积/mm ²	2.3×2.3	2.5×2.5	3×3	3×3	3×3
		射线角度	38°	38°	40°	40°	40°
		冷却方式	油浸自冷	油浸自冷	油浸自冷	油浸自冷	油浸自冷
4		最大容量最长连续工作时间/min	5	5	5	5	5
5		射线最大穿透厚度 (钢铁) /mm	12	30	43	54	62
6	体 积	控制箱 (长×宽×高) /mm	385×305×179				
		射线柜/mm	φ246×406	270×205×600	420×260×650	420×260×670	480×310×865
7	重 量	控制箱/kg	22				
		射线柜/kg	23	35	55	63	97

表 22-68 国产携带式 X 射线机主要性能及技术规范 (二)

序号	项 目 \ 型 号		技 术 数 据			
			TX1605—2	TX2005—2	TX2507—3	TX3006—3
1	输 入	电压/V	220	220	220	220
		周率/Hz	50	50	50	50
		相数	单相	单相	单相	单相
		最大容量				
2	输 出	X 射线管两端高压峰值 (KVP)	160	200	250	300
		阳极电流 (平均值) /mA	5	5	7	6
3	射 线 管	型号				
		焦点面积/mm ²	2.5×2.5	2.5×2.5	3.0×3.0	3.0×3.0
		射线角度	40±1°	40±1°	40±1°	40±1°
		冷却方式	油浸自冷	油浸自冷	油浸自冷	油浸自冷
4		最大容量最长连续工作时间	工作 5min 休息 5min	工作 5min 休息 5min	工作 5min 休息 5min	工作 5min 休息 5min
5		射线最大穿透厚度 (钢铁) /mm	铅箔增感: 20 荧光增感: 30	铅箔增感: 30 荧光增感: 45	铅箔增感: 40 荧光增感: 60	铅箔增感: 50 荧光增感: 70
6	体 积	操纵台 (长×宽×高) /mm	380×337×214	380×337×214	455×380×265	455×380×265
		X 射线发生器	φ316×570	φ316×570	φ452×760	φ452×760
7	重 量	操纵台/kg	20	20	30	30
		X 射线发生器/kg	40	40	105	105

表 22-69 国产移动式 X 射线机技术规范

项 目 \ 型 号	TY0530—1	TY1512/4—1	TG1512/4—1	TY2020—1	TX2515	TY4010/4—2
管电压/kV	50	150	150	200	250	400
管电流/mA	30	12 (大焦点) 4 (小焦点)	12 (大焦点) 4 (小焦点)	20	15	10 (大焦点) 4 (小焦点)
焦点尺寸 /mm	1.5×1.5 或 1.8×1.2	2.5×2.5 1.0×1.0	2.5×2.5 1.0×1.0	φ10 或 6×6	4×4	4×4 1.8×1.8
射线角度	40±1°			40±1°	40°	40±1°
穿透厚度 /mm	30 (Al)	20 (Fe 铅箔增感) 30 (Fe 荧光增感)		60 (Fe)	74 (Fe) 200 (Al)	100 (Fe 铅箔增感) 120 (Fe 荧光增感)
外型尺寸/mm	1830×650 ×1810	1100×900 ×2100	1750×1000 ×1200	2200×2500 ×850	1500×750 ×650	1510×780 ×1940
总重量/kg	250		2500	800	500	1800

表 22-70 时代公司 X 射线探伤机性能参数表

型号	X 射线管	管电压 /kV	管电流 /mA	焦点尺寸 /mm	外形尺寸/mm		重量/kg	
					发生器	控制器	发生器	控制器
TF3120GD	玻璃、定向	100 ~ 250	5	1.5 × 1.5	286 × 242 × 650	378 × 372 × 174	22	13
TF3120GP	玻璃、平靶、周向			1.0 × 3.5				
TF3120GC	玻璃、锥靶、周向			1.5 × 3.5				
TF3125GD	玻璃、定向	150 ~ 250	5	2 × 2	328 × 278 × 750	378 × 372 × 174	37	13
TF3125GP	玻璃、平靶、周向			1.0 × 2.5				
TF3125GC	玻璃、锥靶、周向			1.0 × 2.5				
TF3130CD	陶瓷、定向	170 ~ 300	5	2.5 × 2.5	370 × 312 × 747	378 × 372 × 174	40	13
TF3130GD	玻璃、定向			3.5 × 3.5	370 × 312 × 780			
TF3130GP	玻璃、平靶、周向			1 × 3.5				
TF3130GC	玻璃管、锥靶、周向			1 × 3.5				

表 22-71 德国 ERESO-PROGRAMM-73 便携式 X 射线机技术规范

项 目 \ 型 号	160/5	160/10	200/8	200/5RK	250/6R	260/6	300/5	300/5RK
高压可调 范围/kV	30—160	40—160	40—200	40—200	50—250	60—260	60—300	60—300
管电流 /mA	5	10	8	5	6	6	5	5
射线角度	40°	40°	40°	360° × 50°	360° × 40°	40°	40°	360° × 50°
焦点面积 /mm ²	1.2 × 1.2	2.3 × 2.3	2.3 × 2.3	4 × 1	4.8 × 4.8	2.3 × 2.3	2.3 × 2.3	4.8 × 1
穿透厚度 /mm (Fe)	18	22	33	22	40	45	50	48
射线发生 器质量/kg	30	43	43	41	65	80	80	95
操纵台尺寸 /mm	430 × 210 × 310	597 × 236 × 366	597 × 236 × 356	φ280 × 782	φ300 × 994	823 × 292 × 447	823 × 292 × 447	φ340 × 1090

表 22-72 德国移动式 X 射线机技术规范

项 目 \ 型 号	射线管 型号	管电压 /kV	小焦点 管电流 /mA	大焦点 管电流 /mA	小焦点 尺寸 /mm	大焦点 尺寸 /mm	窗口材料 及厚度 /mm	射线角度
ISOVOLT100	100/6C	100	—	6	—	0.6 × 0.6	0.75Be	30°
	100/10	100	—	10	—	1.5 × 1.5	1Be	40°
ISOVOLT150	150/20C	150	—	20	—	3 × 3	3Be	40°
	150/20	150	4	20	0.4 × 0.4	3 × 3	3Be	40°
	150/47R	150	—	15	—	1.5 × 5	0.4Cu	360° × 30°
	150/63R	150	—	15	—	1.5 × 5	0.4Cu	
ISOVOLT300	300/10	300	4	10	1.2 × 1.2	4 × 4	2.5Al	40°
	300/10A	300	4	10	1.2 × 1.2	4 × 4	2.5Al	40°
	300/8R	300	—	8	—	1.5 × 5	0.4Cu	360° × 30°
ISOVOLT400	400/10	400	4	10	1.8 × 1.8	4 × 4	4Al	40°

表 22-73 比利时波涛 X 射线探伤机性能参数表

型号	输出电压范围/kV	最大钢穿透力/mm	焦点尺寸/mm
D2258	80 ~ 225	46	$\phi 2.5 \times 2.5$
D3006	100 ~ 300	64	$\phi 2.5 \times 2.5$
D3605	160 ~ 360	82	$\phi 2.5 \times 2.5$
D2257	80 ~ 225	44	$\phi 5 \times 0.5$
D3003	100 ~ 300	56	$\phi 5 \times 0.5$
D3005	100 ~ 300	61	$\phi 5 \times 0.5$
D3605	160 ~ 360	82	$\phi 5 \times 0.5$

表 22-74 日本理工 RIX-200MC 型 X 射线探伤机性能参数

型号:	RIX-200MC		RIX-300MC	
输出电压/kV	最大 200 60 ~ 100 100 ~ 200	管电流 3MA	最大 300 160 ~ 200 200 ~ 300	
电源/V	180 ~ 240	50/60Hz	180 ~ 240	50/60Hz
焦点尺寸/mm	2.0 × 2.0		2.5 × 2.5	
穿透力/mm	钢 28	钢 50		
功率/kVA	1		1.5	

表 22-75 日本理学公司 X 射线探伤机性能参数表

名称	300 周向	250 周向	200 周向	300 定向	250 定向	200 定向
型号	300EG—B2F	250EG—B2F	200EG—B2F	300EG—S3	250EG—S3	200EG—S3
容量/kV	200 ~ 300	150 ~ 250	70 ~ 300	200 ~ 300	200 ~ 300	200 ~ 300
穿透能力/mm	52	42	27	54	42	29
焦点尺寸/mm	1.0 × 2.5	1.0 × 2.4	2.0 × 2.0	2.5 × 2.5	2.0 × 2.0	2.0 × 2.0
功率/kVA	2.4	1.8	1.4	2.2	3.6	2.4
重量/kg	发射管 54 控制箱 25	发射管 33 控制箱 22	发射管 21 控制箱 22	发射管 35 控制箱 25	发射管 25 控制箱 20	发射管 20 控制箱 19

表 22-76 日本理学 (Rigaku) 便携式 X 射线机技术规范

项 目	100GS	130G	160EG	160EG- 360°	200EG	200EG- 360°	250EG	250EG- 360°
管电压调节 范围/kV	10 ~ 50 50 ~ 100	30 ~ 130	40 ~ 160	40 ~ 160	80 ~ 200	80 ~ 200	70 ~ 250	70 ~ 250
管电流/mA	10 (10 ~ 50kV) 5 (50 ~ 100kV)	3/5	5	5	5	5	5	3
穿透厚度/ mm	100 (Al) 10 (Fe)	130 (Al) 35 (Fe)	50 (Fe)	45 (Fe)	70 (Fe)	65 (Fe)	85 (Fe)	80 (Fe)
焦点尺寸/ mm	1 × 1	1.5 × 1.5	1.5 × 1.5	2.5 × 2.5	2.1 × 2.1	2.5 × 2.5	2.3 × 2.3	2.5 × 2.5
X 射线发生 器尺寸/mm	570 × 323 × 205	570 × 323 × 205	$\phi 280$ × 825	$\phi 330$ × 600	$\phi 326$ × 695	$\phi 326$ × 695	$\phi 356$ × 810	$\phi 356$ × 810

(续)

项 目 \ 型 号	100GS	130G	160EG	160EG-360°	200EG	200EG-360°	250EG	250EG-360°
操纵台尺寸 /mm	453 × 405 × 217	300 × 250 × 190	453 × 405 × 217	453 × 405 × 217	453 × 405 × 217	453 × 405 × 217	453 × 405 × 217	453 × 405 × 217
X 射线发生器重量/kg	27	28	28	33	38.5	45	55.5	55.5
操纵台重量 /kg	20	13	22	23	23	23	23	23

表 22-77 X 射线管电压与透照钢板厚度 (单位: mm)

管 电 压 / kV	胶 片 增 感 屏	增感胶片		非 增 感 胶 片			
				高感度 (粗粒子)	中感度 (微粒子)	低感度 (超微粒子)	
		荧光增感	金属荧光增感	铅箔 (0.03mm)	铅箔	金属荧光增感	铅箔
125		30	25	20	12	20	9
160		45	40	32	20	32	15
185		55	48	40	26	40	20
200		60	52	45	30	45	25
250		75	65	55	42	55	35
300		95	85	70	55	70	45
400		130	115	100	80	100	65

注: 焦距: 600mm; 曝光时间: 数分钟。

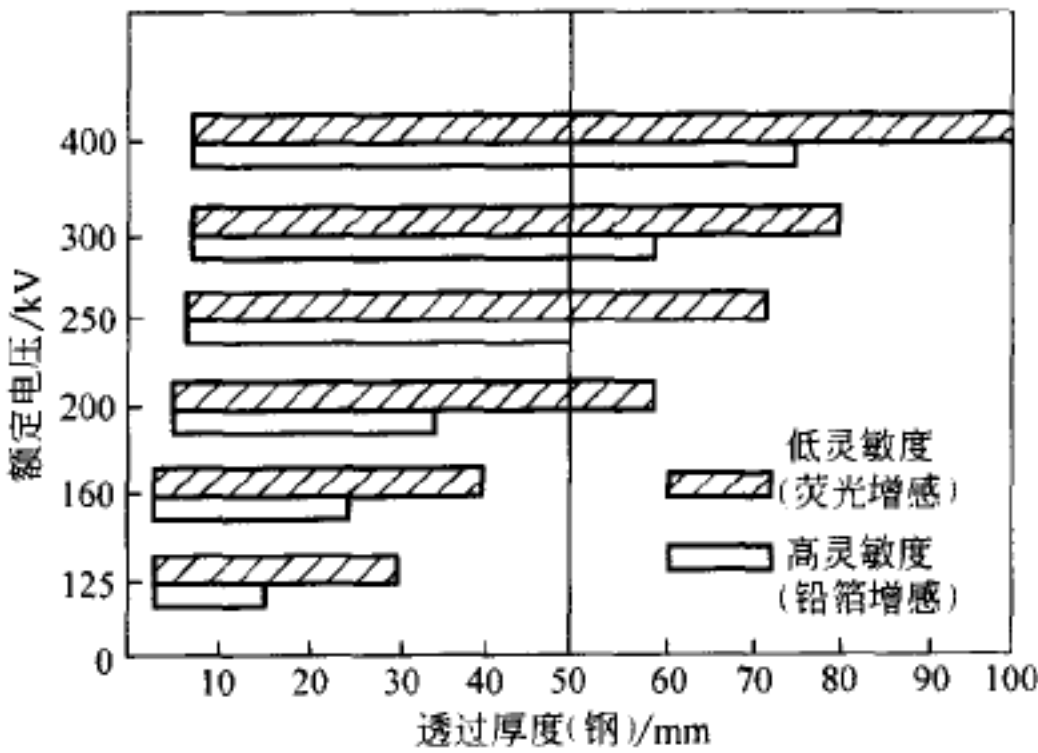


图 22-30 X 射线机额定管电压与透过厚度关系

表 22-78 几种金属的射线探伤等效系数的近似值 (以钢为基础)

金属或合金	使用的射线能量											
	50 kV	100 kV	140 kV	220 kV	250 kV	400 kV	1000 kV	2000 kV	6 ~ 31 MeV	镅	钴 60	铱 192
铝 (1100)	0.08	0.08	0.12	0.18								
铝 (2024)	0.12	0.12	0.13	0.14								
镁	0.05	0.05	0.05	0.08								

(续)

金属或合金	使用的射线能量											
	50 kV	100 kV	140 kV	220 kV	250 kV	400 kV	1000 kV	2000 kV	6~31 MeV	镅	钴 60	铱 192
碳钢	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
不锈钢	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
铜		1.5	1.5	1.4	1.4							
蒙乃尔合金		1.7	1.5	1.2								
铅			14.0	11.0			3.0	2.5	2.4	2.3	2.3	4.0
铈		2.4	2.0	1.9	1.7	1.5	1.0					
铀					18.0	16.0	12.0					

表 22-79 增感屏的选用

射线种类	增感屏材料	前屏厚度	后屏厚度
< 120kV	铅	—	> 0.10
120 ~ 250kV		0.025 ~ 0.125	
250 ~ 400kV		0.05 ~ 0.16	
1 ~ 3MeV		1.00 ~ 1.60	1.00 ~ 1.60
3 ~ 8MeV	铜、铅		
8 ~ 35MeV	钽、钨、铅		—
Ir192	铅	0.05 ~ 0.16	≥ 0.16
Co60	铜、钢、铅	0.50 ~ 2.00	0.25 ~ 1.00

表 22-80 胶片按粒度的大体分类

胶片分类	超微粒	微粒	细颗粒	粗颗粒
照相速度	最慢	慢	较快	快
增感方式	一般不用增感或用铅增感屏	一般不用增感或用金属增感屏	一般不用增感或用金属增感屏, 满足灵敏度条件可用荧光增感屏	荧光增感屏
应用	要求很高灵敏度、特别重要工件的照相	特殊要求的射线照相	一般要求的射线照相	感光速度快、质量要求不高的射线照相
常用牌号	三角牌 D ₂ 型英国依尔福 B 型, 俄罗斯 PT-5 型, 柯达 R、M 型, 富士 50	三角牌 D ₄ 型, 英国依尔福 C 型, 俄罗斯 PT-4 型, 天津 V 型, 柯达 T 型, 富士 80	三角牌 D ₇ 型, 英国依尔福 F 型, 俄罗斯 PT-3 型, 天津 III 型, 柯达 AA 型, 富士 100	比利时三角牌 D ₁₀ 型, 英国依尔福 G 型, 俄罗斯 PT-2 型, 天津 II 型, 柯达 RP 型, 富士 400

表 22-81 底片评定的有关标准法规

适用范围 名称	中国标准	日本标准	DIN 标准	美国法规和标准	备 注
铸件 验收 标准	HB967—1970 HB966—1970 HB5131—1979	JIS G0581—68 JIS H0522—69 JCSS G2—80	DIN17248 DIN1690 第 2 部分	AST ME186—76、 E280—75、E466—75 ASME 第Ⅷ卷第 1 章 附录 7	DIN 验收标准以 ASTM 参考照相 E466、E186、 E280 为基准
焊接 验收标准	GB/T3323—1987	JIS Z3104—68 JIS Z3105—77 JIS Z3106—71 JIS Z3107—73	DIN8563 第 3 部分	ASTM E390—75 ASME 第Ⅷ卷第 2 章第 1~5 部分、附录 8	DIN 包括验收标 准的说明

表 22-82 常见的伪缺陷

底 片 上 的 痕 迹	产 生 原 因
水波状黑色细条纹	胶片受潮膨胀、表面起皱
类夹杂物斑纹	冲洗不净；增感屏污垢、剥落、增感作用下降
淡密度圆形斑点	胶片表面附有小气泡
黑色条纹	显影时摇动不匀
类裂纹影象	受压受折、胶片感光
形状不一之斑点或黑边淡密度斑点	未显影时，胶片沾有显影液
指纹斑点	手不洁并接触胶片

6. 内应力测定（表 22-83 ~ 表 22-86）

表 22-83 X 射线应力仪的性能、功能、使用范围对比

特 性 仪 器 型 号	XYL—73	XYL—75	X—82
2 θ 角扫描范围	143° ~ 167°	110° ~ 170°	110° ~ 170°
Ψ 角范围	- 15° ~ 50°	- 15° ~ 50°	- 15° ~ 50°
光栏散射角	0.29°, 0.43°, 0.72°	0.32°, 0.64°, 0.96°	0.32°, 0.64°, 0.96°
扫描方式	连续	阶梯	阶梯
计数管类型	盖格	正比	正比
X 光管类型	普通	小型	超小型
可供靶材	Cu, Co, Cr	Cu, Co, Cr	Cu, Co, Cr
入射线最大摆动范围	0	$\pm 5^\circ$	$\pm 15^\circ$

表 22-84 推荐的衍射方法和对不同的铁及非铁合金的 X 射线弹性常数及其整体值

合 金	射 线	点阵平面 (hkl)	衍射角 (2θ)(度)	弹性常数 ^① ($E/I + \nu$) /GPa(10^6 psi)hkl	整 体	整体 误差 (%)	K_{45} ^②		线吸收系数 μ	
							/MPa	/ksi	/cm ⁻¹	/in ⁻¹
铝基合金										
2014-T6	CrK α	(311)	139.0	59.4 ± 0.76(8.62 ± 0.11)	54.5(7.9)	- 8.3	387	56.2	442	1124
2024-T351	CrK α	(311)	139.3	53.8 ± 0.55(7.81 ± 0.08)	54.5(7.9)	+ 1.1	348	50.5	435	1105
7075-T6	CrK α	(311)	139.0	60.9 ± 0.48(8.83 ± 0.07)	53.8(7.8)	- 11.4	397	57.6
7050-T6	CrK α	(311)	139.0	57.1 ± 0.41(8.28 ± 0.06)	53.8(7.8)	- 5.8	372	54.0	443	1126
铁基合金										
Incoloy800	CuK α	(420)	147.2	148.2 ± 2.8(21.5 ± 0.4)	147.5(21.4)	- 0.4	758	110.0	1656	4205
304L	CuK α	(420)	147.0	157.2 ± 2.8(22.8 ± 0.4)	151.0(21.9)	- 3.9	814	118.0	2096	5321
316	CuK α	(420)	146.5	132.4 ± 1.4(19.2 ± 0.2)	153.8(22.3)	+ 16.0	696	101.0	2066	5245
因瓦	CuK α	(420)	147.0	108.2 ± 4.1(15.7 ± 0.6)	112.4(16.3)	+ 3.8	560	81.2	1706	4330
410(22HRC)	CrK α	(211)	155.1	176.5 ± 0.7(25.6 ± 0.1)	155.8(22.6)	- 11.7	680	98.6	840	2129
410(42HRC)	CrK α	(211)	155.1	173.1 ± 1.4(25.1 ± 0.2)	155.8(22.6)	- 9.9	667	96.7	840	2129
1050(56HRC)	CrK α	(211)	156.0	184.1 ± 2.1(26.7 ± 0.3)	148.2(21.5)	- 19.4	683	99.0	885	2244
4340(50HRC)	CrK α	(211)	156.0	168.9 ± 2.8(24.5 ± 0.4)	156.5(22.7)	- 7.3	627	90.9	909	2307
6260	CrK α	(211)	155.5	169.6 ± 2.8(24.6 ± 0.4)	158.9(23.0)	- 6.5	643	93.2	894	2271
9310	CrK α	(211)	155.5	172.4 ± 2.8(25.0 ± 0.4)	160.0(23.2)	- 7.2	653	94.7	894	2271
52100	CrK α	(211)	156.0	173.7 ± 2.1(25.2 ± 0.3)	153.8(22.3)	- 11.5	645	93.5	714	2307
M50(62HRC)	CrK α	(211)	154.0	179.3 ± 2.1(26.0 ± 0.3)	152.9(22.9)	- 11.9	724	105.0	1000	2490
17-4PH	CrK α	(211)	155.0	180.0 ± 0.7(26.1 ± 0.1)	158.9(23.0)	- 11.9	696	101.0	888	2254
镍基合金										
Inconel600	CuK α	(420)	150.8	159.3 ± 0.7(23.1 ± 0.1)	165.5(24.0)	+ 3.9	724	105.0	896	2275
Inconel718	CuK α	(420)	145.0	140.0 ± 2.1(20.3 ± 0.3)	156.5(22.7)	- 8.9	772	112.0	1232	3127
InconelX-750	CuK α	(420)	151.0	160.6 ± 1.4(23.3 ± 0.2)	160.6(24.0)	+ 3.0	724	105.0	813	2062
Incoloy910	CuK α	(420)	146.0	134.4 ± 3.4(19.5 ± 0.5)	158.6(23.0)	+ 17.9	717	104.0	1408	3569
Rene95	CuK α	(420)	146.7	168.9 ± 0.7(24.5 ± 0.1)	164.1(23.8)	- 2.8	882	128.0	935	2370
钛基合金										
工业纯钛	CuK α	(21.3)	139.5	90.3 ± 1.4(13.1 ± 0.2)	84.8(12.3)	- 6.1	581	84.3	917	2320
Ti6Al4V	CuK α	(21.3)	141.7	84.1 ± 0.7(12.2 ± 0.1)	84.8(12.3)	+ 0.3	509	73.9	867	2203
Ti6Al2Sn4Zr2Mo	CuK α	(21.3)	141.5	102.0 ± 1.4(14.8 ± 0.2)	86.2(12.5)	- 15.5	622	90.2	866	2200

①四点弯曲试验得到的常数；② K_{45} 为45°倾角时，衍射峰每4°偏移所需应力值。

表 22-85 X 射线靶材, 特征 X 射线波长和滤波片

原子序数	靶材元素	波长/nm					激发计压/kV	滤波片	最佳工作电压/kV
		$K_{\alpha 1}$	$K_{\alpha 2}$	K_{α}	K_{β}	吸收限 λ_K			
24	Cr	0.228962	0.229351	0.229092	0.208480	0.201012	6.0	V	18 ~ 30
25	Mn	0.210175	0.210568	0.210306	0.191015	0.189636	6.5	Cr	20 ~ 32
26	Fe	0.193597	0.193991	0.193728	0.175653	0.174334	7.1	Mn	21 ~ 35
27	Co	0.178892	0.179278	0.179021	0.162075	0.160811	7.7	Fe	23 ~ 38
28	Ni	0.165784	0.166169	0.165912	0.150010	0.148802	8.3	Co	25 ~ 41
29	Cu	0.154051	0.154433	0.154178	0.139217	0.138043	9.0	Ni	27 ~ 45
30	Zr	0.143511	0.143894	0.143639	0.129522	0.128329	9.7	Cu	30 ~ 50
40	Mo	0.070926	0.071354	0.071069	0.063225	0.061977	20.0	Zr	60 ~ 100

表 22-86 常用材料的测定参数和弹性常数

被测材料	辐射	衍射角	衍射角 ($2\theta_0$)	K_1 /kPa	d_1 ($\psi_1 = \eta$)	d_2 ($\psi_2 = 15^\circ$ + η)	d_3 ($\psi_3 = 30^\circ$ + η)	d_3 ($\psi_4 = 45^\circ$ + η)	K_2 / kPa
α -Fe, 退火, 正火, 淬火马氏体钢 γ -Fe 奥氏体钢	Cr K_{α}	(211)	156.4	-31.8	-1.2322	-0.5811	+0.3907	+1.4226	48.3
	Co K_{α}	(310)	161.4	-23.0	-1.2477	-0.6269	+0.3776	+1.4970	36.4
	Cr K_{β}	(311)	149.6	-35.6	-1.2224	-0.5310	+0.4086	+1.3447	51.9
	Cr K_{α}	(220)	128.3	-62.1	-1.2785	-0.4339	+0.4838	+1.2287	88.4
铝及铝合金	Cr K_{α}	(222)	156.7	-9.2	-1.2329	-0.5836	+0.3899	+1.4266	14.0
	Co K_{α}	(420)	162.1	-7.1	-1.2504	-0.6342	+0.3758	+1.5083	11.2
	Co K_{α}	(331)	148.7	-12.5	-1.2221	-0.5253	+0.4111	+1.3362	18.2
铜 4-6 黄铜 α 相	Cr K_{β}	(311)	146.5	-24.5	-1.2223	-0.5120	+0.4174	+1.3168	35.4
	Cu K_{α}	(420)	144.7	-25.9	-1.2335	-0.5018	+0.4227	+1.3026	37.1
	Co K_{α}	(400)	150.0	-15.3	-1.2226	-0.5336	+0.4075	+1.3487	22.4
	Co K_{β}	(331)	145.0	-18.0	-1.2233	-0.5035	+0.4219	+1.3048	25.9
4-6 黄铜 β 相 3-7 黄铜 钛及钛合金	Co K_{α}	(321)	155.5	-8.1	-1.2302	-0.5737	+0.3930	+1.4109	12.3
	Co K_{α}	(400)	151.0	-14.8	-1.2234	-0.5403	+0.4048	+1.3588	21.8
	Co K_{β}	(331)	146.0	-17.4	-1.2225	-0.5091	+0.4189	+1.3127	25.2
	Co K_{α}	(114)	154.2	-17.2	-1.2276	-0.5635	+0.3964	+1.3947	25.7
镍及镍合金	Cr K_{β}	(311)	157.7	-27.3	-1.2356	-0.5922	+0.3873	+1.4405	41.8
	Cu K_{α}	(420)	155.6	-28.9	-1.2304	-0.5745	+0.3927	+1.4122	43.7
钴及钴合金	Cr K_{α}	(110)	132.4	-58.9	-1.2587	-0.4464	+0.4674	+1.238	83.2

22.6 耐腐蚀性能(表 22-87 ~ 表 22-92)

表 22-87 金属耐蚀性十级标准

耐蚀等级	耐蚀性类别	腐蚀速率 $/\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$	失重/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$					
			铁基合金	铜及铜合金	镍及镍合金	铅及铅合金	铝及铝合金	镁及镁合金
1	完全耐蚀	< 0.001	< 0.0009	< 0.001	< 0.001	< 0.0012	< 0.0003	< 0.002
2	很耐蚀	$0.001 \sim 0.005$	$0.0009 \sim 0.0045$	$0.001 \sim 0.0051$	$0.001 \sim 0.005$	$0.0012 \sim 0.0065$	$0.0003 \sim 0.0015$	$0.0002 \sim 0.001$
3		$0.005 \sim 0.01$	$0.0045 \sim 0.009$	$0.0051 \sim 0.01$	$0.005 \sim 0.01$	$0.0065 \sim 0.012$	$0.0015 \sim 0.003$	$0.001 \sim 0.002$
4	耐蚀	$0.01 \sim 0.05$	$0.009 \sim 0.045$	$0.01 \sim 0.051$	$0.01 \sim 0.05$	$0.012 \sim 0.065$	$0.003 \sim 0.015$	$0.002 \sim 0.01$
5		$0.05 \sim 0.1$	$0.045 \sim 0.09$	$0.051 \sim 0.10$	$0.05 \sim 0.10$	$0.065 \sim 0.12$	$0.015 \sim 0.031$	$0.01 \sim 0.02$
6	尚耐蚀	$0.1 \sim 0.5$	$0.09 \sim 0.45$	$0.10 \sim 0.51$	$0.10 \sim 0.50$	$0.12 \sim 0.65$	$0.031 \sim 0.154$	$0.02 \sim 0.10$
7		$0.5 \sim 1.0$	$0.45 \sim 0.9$	$0.51 \sim 1.02$	$0.50 \sim 1.00$	$0.65 \sim 1.20$	$0.154 \sim 0.31$	$0.10 \sim 0.20$
8	欠耐蚀	$1.0 \sim 5.0$	$0.9 \sim 4.5$	$1.02 \sim 5.1$	$1.00 \sim 5.00$	$1.20 \sim 6.50$	$0.31 \sim 1.54$	$0.20 \sim 1.00$
9		$5.0 \sim 10.0$	$4.5 \sim 9.1$	$5.1 \sim 10.2$	$5.00 \sim 10.00$	$6.50 \sim 12.00$	$1.54 \sim 3.1$	$1.00 \sim 2.00$
10	不耐蚀	≥ 10	≥ 9.1	≥ 10.2	≥ 10.00	≥ 12	≥ 3.1	≥ 2.0

表 22-88 点蚀评级标准

点蚀级别	蚀孔密度/ m^{-2}	蚀孔尺寸/ mm^2	蚀孔深度/ mm
1	2.5×10^3	0.5	0.4
2	1×10^4	2.0	0.8
3	5×10^4	8.0	1.6
4	1×10^5	12.5	3.2
5	5×10^5	24.5	6.4

表 22-89 不锈钢孔蚀试验规范

腐蚀介质成分	腐蚀温度/ $^{\circ}\text{C}$	腐蚀时间/ min
10.8% $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 在 0.05N HCl 中溶液	20	240
10g $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + 5g NaCl + 2.5mL 浓 HCl + 200mL H_2O	室温	3
10g $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + 4.5mL 浓 HCl 用水稀释到 1L	35	120
0.57N NH_4Cl + 2% $\text{FeNH}_4(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	30	60
0.5% $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 在 4% NaCl 中溶液	20	1 ~ 10

注:溶液量 $> 20\text{mL}/\text{cm}^2$ 试样面积。

表 22-90 草酸电解浸蚀后的组织特征和评级标准

腐蚀级别	组织特征
1	晶界没有腐蚀沟槽,晶粒间呈台阶状
2	晶界有腐蚀沟槽,但没有一个晶粒被腐蚀沟槽所包围
3	晶界有腐蚀沟槽,个别或大部分晶粒已被腐蚀沟槽所包围

表 22-91 沸腾硝酸腐蚀试验的耐蚀性等级评定

级别	腐蚀速率/ $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$	级别	腐蚀速率/ $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$
1	≤ 0.60	3	$> 1.00 \sim \leq 2.00$
2	$> 0.60 \sim \leq 1.00$	4	> 2.00

表 22-92 金属抗氧化性级别

级别	腐蚀速率/ $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$	抗氧化性分类	级别	腐蚀速率/ $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$	抗氧化性分类
1	< 0.1	完全抗氧化	4	$3.0 \sim 10.0$	弱抗氧化
2	$0.1 \sim 1.0$	抗氧化	5	> 10.0	不抗氧化
3	$1.0 \sim 3.0$	次抗氧化			

附录 通用数据和换算

附表 1 法定计量单位

量的名称	单位名称	单位符号	量的名称	单位名称	单位符号
1. 国际单位制的基本单位			光通量	流[明]	lm
长度	米	m	光照度	勒[克斯]	lx
质量	千克(公斤)	kg	放射性活度	贝可[勒尔]	Bq
时间	秒	s	吸收剂量	戈[瑞]	Gy
电流	安[培]	A	剂量当量	希[沃特]	Sv
热力学温度	开[尔文]	K	4. 国家选定的非国际单位制单位		
物质的量	摩[尔]	mol	时间	分	min
发光强度	坎[德拉]	cd		[小]时	h
2. 国际单位制的辅助单位				天(日)	d
平面角	弧度	rad	平面角	[角]秒	(")
立体角	球面度	sr		[角]分	(')
3. 国际单位制中具有专门名称的导出单位				度	(°)
频率	赫[兹]	Hz	旋转速度	转 每 分	r/min
力;重力	牛[顿]	N	长 度	海 里	nmile
压力,压强;应力	帕[斯卡]	Pa	速 度	节	kn
能量;功;热	焦[耳]	J	质 量	吨	t
功率;辐射通量	瓦[特]	W		原子质量单位	u
电 荷 量	库[仑]	C	体 积	升	L,(l)
电位;电压;电动势	伏[特]	V	能	电 子 伏	eV
电 容	法[拉]	F	功率级差	分 贝	dB
电 阻	欧[姆]	Ω	线 密 度	特[克斯]	tex
电 导	西[门子]	S	5. 十进倍数和分数单位的词头		
磁 通 量	韦[伯]	Wb	所表示的因数	词头名称	词头符号
磁通量密度	特[斯拉]	T	10^{18}	艾[可萨]	E
磁感应强度	特[斯拉]	T	10^{16}	拍[它]	P
电 感	亨[利]	H	10^{12}	太[拉]	T
摄氏温度	摄 氏 度	℃	10^9	吉[咖]	G
所表示的因数	词头名称	词头符号	6. 由以上单位构成的组合形式的单位		
10^6	兆	M	指由两个或两个以上单位用相乘、除的形式组合而成的新的单位。也包括只有一个单位,但分子为1的单位		
10^3	千	k	例如,线膨胀系数单位“每摄氏度($^{\circ}\text{C}^{-1}$)”,电量单位“千瓦小时($\text{kW}\cdot\text{h}$)”,压力单位“牛顿每平方米(N/m^2)”等		
10^2	百	h			
10^1	十	da			
10^{-1}	分	d			
10^{-2}	厘	c			
10^{-3}	毫	m			
10^{-6}	微	μ			
10^{-9}	纳[诺]	n			
10^{-12}	皮[可]	P			
10^{-16}	飞[母托]	f			
10^{-18}	阿[托]	a			

注:组合形式的单位名称、符号实例参见常用物理量符号及法定单位。

附表2 常用物理量的法定计量单位

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号
1. 空 间			
[平面]角	$\alpha, \beta, \gamma, \theta, \varphi$	弧度	rad
		度	()
		[角]分	(')
		[角]秒	(")
立体角	Ω	球面度	Sr
*长度	$l, (L)$	米	m
		海里	nmile
宽度	b	米	m
高度	h	米	m
厚度	$\delta, (d, t)$	米	m
半径	r, R	米	m
直径	d, D	米	m
距离	S	米	m
面积	A, S	平方米	m ²
体积容积	V	立方米	m ³
		升	L(l)
2. 时间、周期及有关现象			
*时间	t	秒	s
		分	min
		[小]时	h
		天, [日]	d
角速度	ω	弧度每秒	rad/s
角加速度	α	弧度每二次方秒	rad/s ²
速度	v, u, w, c	米每秒	m/s
		千米每小时	km/h
		节	kn
加速度	a	米每二次方秒	m/s ²
*周期	T	秒	s
时间常数	$\tau, (T)$	秒	s
频率	$f, (\nu)$	赫[兹]	Hz
转速, 旋转频率	n	每秒	s ⁻¹
		转每分	r/min
振幅	A	米	m
角频率, 圆频率	ω	弧度每秒	rad/s
波长	λ	米	m
波数	σ	每米	m ⁻¹
圆波数、角波数	k	弧度每米	rad m ⁻¹
阻尼系数	δ	每秒	s ⁻¹
衰减系数	α	每米	m ⁻¹
相位系数	β	每米	m ⁻¹
传播系数	γ	每米	m ⁻¹
3. 力 学			
*质量	m	千克, (公斤)	kg

(续)

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号
3. 力 学			
密 度	ρ	吨 原子质量单位 千克每立方米 吨每立方米 千克每升	t u kg/m ³ t/m ³ kg/L
相对密度	d	—	—
比容,(比体积)	ν	立方米每千克	m ³ /kg
线 密 度	ρ_l	千克每米 特〔克斯〕	kg/m tex
面 密 度	$\rho_A(\rho_s)$	千克每平方米	kg/m ²
动 量	P	千克米每秒	kg·m/s
动量矩,角动量	L	千克二次方米每秒	kg·m ² /s
转动惯量	$I, (J)$	千克二次方米	kg·m ²
力	F	牛〔顿〕	N
重 力	$W, (P, G)$	牛〔顿〕	N
力 矩	M	牛〔顿〕米	N·m
转矩,力偶距	T	牛〔顿〕米	N·m
压力,压强	P	帕〔斯卡〕	Pa
正应力	σ	帕〔斯卡〕	Pa
切应力,(剪应力)	τ	帕〔斯卡〕	Pa
线 应 变	ϵ, e	—	—
切(剪)应变	ν	—	—
体积应变	θ	—	—
泊 松 比	μ, ν	—	—
横缩系数	m	—	—
弹性模量	E	帕〔斯卡〕	Pa
切变模量	G	帕〔斯卡〕	Pa
(剪切模量)			
体积模量	K	帕〔斯卡〕	Pa
压缩系数	κ	每帕〔斯卡〕	Pa ⁻¹
截面惯性矩	I_a, I	四次方米	m ⁴
极惯性矩	I_p	四次方米	m ⁴
截面系数	W, Z	三次方米	m ³
摩擦系数	$\mu(f)$	—	—
〔动力〕粘度	$\eta, (\mu)$	帕〔斯卡〕秒	Pa·s
运动粘度	ν	二次方米每秒	m ² /s
表面张力	γ, σ	牛〔顿〕每米	N/m
功	$W, (A)$	焦〔耳〕 瓦〔特〕小时 电子伏	J W·h eV
能〔量〕	$E, (W)$	同功的单位	
势能,位能	$E_p, (V)$	同功的单位	
动 能	$E_k, (T)$	同功的单位	
功 率	P	瓦〔特〕	W

(续)

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号
3. 力 学			
质量流量	qm	千克每秒	g/s
体积流量	qV	立方米每秒	m^3/s
雷诺数	Re	—	
4. 热 学			
* 热力学温度	T, H	开[尔文]	K
摄氏温度	t, θ	摄氏度	$^{\circ}C$
线[膨]胀系数	α_L	每开[尔文]	K^{-1}
体[膨]胀系数	α_V, γ	每开[尔文]	K^{-1}
热, 热量	Q	焦[耳]	J
热 流 量	ϕ	瓦特	W
热流[量]密度	q, φ	瓦[特]每平方米	W/m^2
热导率[导热系数]	λ, k	瓦[特]每米摄氏度	$W/(m \cdot ^{\circ}C)$
传热系数	h, a	瓦[特]每平方米开[尔文] 或摄氏度	$W/(m^2 \cdot K)$ 或 $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$
热扩散率	$a, (\alpha, k)$	平方米每秒	m^2/s
热 容	C	焦[耳]每摄氏度	$J/^{\circ}C$
比 热 容	C	焦[耳]每千克摄氏度	$J/(kg \cdot ^{\circ}C)$
比热[容]比	$\gamma = C_p/C_V$	—	
熵	S	焦[耳]每开[尔文]	J/K
比 熵	s	焦[耳]每千克开[尔文]	$J/(kg \cdot K)$
内 能	$U(E)$	焦[耳]	J
焓	$H, (I)$	焦[耳]	J
吉布斯自由能	G	焦[耳]	J
比 内 能	$u, (e)$	焦[耳]每千克	J/kg
比 焓	$h, (i)$	焦[耳]每千克	J/kg
5. 电磁学			
电 流	I	安[培]	A
电荷[量]	Q	库[仑]	C
电荷[体]密度	$\rho, (\eta)$	库[仑]每立方米	C/m^3
电荷面密度	σ	库[仑]每平方米	C/m^2
电场强度	$E, (K)$	伏[特]每米	V/m
电位, (电势)	V, φ	伏[特]	V
电压, 电位差	U	伏[特]	V
(电势差)	·	伏[特]	V
电动势	E	伏[特]	V
电 容	C	法[拉]	F
介电常数	ϵ	法[拉]每米	F/m
(电容率)			
电流密度	$J, (S, \delta)$	安[培]每平方米	A/m^2
电 阻	R	欧[姆]	Ω
电 抗	X	欧[姆]	Ω
阻 抗	Z	欧[姆]	Ω
[直流]电导	G	西[门子]	S
电 纳	B	西[门子]	S

(续)

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号
5. 电 磁 学			
导 纳	Y	西[门子]	S
电 阻 率	ρ		
电 导 率	ν, σ, K	西[门子]每米	S/m
电感, 自感	L	亨[利]	H
耦合系数	$k, (\kappa)$	—	
互 感	M, L_{12}	亨[利]	H
磁漏系数	σ	—	
绕线匝数	N		
相 数	m		
品质因数	Ω		
相[位]差, 相[位]移	φ	弧度	rad
有功功率	P	瓦[特]	W
无功功率	$Q, (P_q)$	瓦[特]	W
磁场强度	H	安[培]每米	A/m
磁通势, 磁动势	F, F_m	安[培]	A
磁位势(磁势差)	U_m	安[培]	A
磁[通]量密度	B	特[斯拉]	T
磁感应强度			
磁通[量]	φ	韦[伯]	Wb
磁 导 率	μ	亨[利]每米	H/m

6. 光、电磁辐射

波 长	λ	米	m
辐[射]能	$Q, W, (Q_e, U)$	焦[耳]	J
辐[射]功率, 辐[射能]通量	$P, \Phi, (\Phi_e)$	瓦[特]	W
辐[射]强度	$I, (I_e)$	瓦[特]每球面度	W/sr
光 通 量	$\phi, (\phi_v)$	流[明]	lm
光 量	$Q(Q_v)$	流[明]秒	lm·s
发光强度	$I, (I_v)$	坎[德拉]	cd
[光]亮度	$L, (L_v)$	坎[德拉]每平方米	cd/m ²
[光]照度	$E, (E_v)$	勒[克斯]	lx
曝 光 量	H	勒[克斯]秒	lx·s
折 射 率	n		

7. 声 学

静压[力]	P_0, p_s	帕[斯卡]	Pa
声 压	P	帕[斯卡]	Pa
声强[度]	I	瓦[特]每平方米	W/m ²
声 强 级	L_p	分贝	dB
声功率级	$L_w, (L_p)$	分贝	dB
声 压 级	L_I	分贝	dB
声 速	c	米每秒	m/s

8. 物理化学和分子物理

物质的量	$n, (\nu)$	摩[尔]	mol
------	------------	------	-----

(续)

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号
8. 物理化学和分子物理			
摩尔质量	M	千克每摩[尔]	kg/mol
摩尔体积	V_m	立方米每摩[尔]	m ³ /mol
摩尔内能	$U_m, (E_m)$	焦[耳]每摩[尔]	J/mol
摩尔热容	C_m	焦[耳]每摩[尔]开[尔文]	J/(mol·K)
摩尔熵	S_m	焦[耳]每摩[尔]开[尔文]	J/(mol·K)
密度,(质量密度)	ρ	千克每立方米	kg/m ³
物质 B 的质量浓度	ρ_B	千克每升	kg/L
物质 B 的浓度	C_B , 化学中	摩[尔]每立方米	mol/m ³
物质 B 的物质的量浓度	也用[B]	摩[尔]每升	mol/L
溶质 B 的质量摩尔浓度	b_m, m_B	摩[尔]每千克	mol/kg
物质 B 的化学势	μ_B	焦[耳]每摩[尔]	J/mol
物质 B 的绝对活度	λ_B		
物质 B 的分压	P_B	帕[斯卡]	Pa
物质 B 的活度系数	f_B		
溶质 B 的相对活度	a_m, B_m, a_B		
溶质 B 的活度系数	ν_b		
[化学反应]亲和势	A	焦[耳]每摩[尔]	J/mol
扩散系数	D	平方米每秒	m ² /s
热扩散系数	D_T	平方米每秒	m ² /s
9. 原子、核和固体物理			
半衰期	$T_{1/2}$	秒	s
放射性活度	A	贝克[勒尔]	Bq
吸收剂量	D		
照射量	x	库[仑]每千克	C/kg
点阵基矢[量]	a_1, a_2, a_3	米	m
晶格基矢[量]	a, b, c		* 埃 = 1 Å = 10 ⁻¹⁰ m = 0.1 nm
点阵矢[量], 晶格矢[量]	R, R_0, T	米	* 埃 = 1 Å = 10 ⁻¹⁰ m = 0.1 nm
倒易点阵基矢[量], 倒格子基矢[量]	b_1, b_2, b_3 a^*, b^*, c^*	每米	m ⁻¹
倒易点阵矢[量] 倒格[子]矢[量]	G	每米	m ⁻¹
点阵面间距	d	米	m
晶面间距			
布拉格角	θ	弧度	rad
柏格斯氏量	b	米	m
德拜温度	Θ_D	开[尔文]	K
居里温度	T_0	开[尔文]	K
超导体转变温度	T_0	开[尔文]	K

附表3 基本常数及其单位换算

圆周率	$\pi = 3.1415927$
自然对数的底	$e = 2.7182818$
真空中光速	$c = 299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 299792458 \times 10^2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$
真空磁导率	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1} = 12.5663706144 \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$
真空电容率	$\epsilon_0 = 8.854187818 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$
精细结构常数	$\alpha = 7.2973506 \times 10^{-3} \quad \alpha^{-1} = 137.03604$
基本电荷(元电荷)	$e = 1.6021892 \times 10^{-19} \text{ C} = 1.6021892 \times 10^{-20} \text{ 电磁单位} = 4.803242 \times 10^{-19} \text{ 静电单位}$
普朗克常数	$h = 6.626176 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 6.626176 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$
阿伏伽德罗常数	$N_A = 6.022045 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
原子质量单位	$u = 1.6605655 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1.6605655 \times 10^{-24} \text{ g}$
电子静止质量	$m_e = 9.109534 \times 10^{-31} \text{ kg} = 9.109534 \times 10^{-28} \text{ g} = 5.4858026 \times 10^{-4} u$
质量静止质量	$m_p = 1.6726485 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1.6726485 \times 10^{-24} \text{ g} = 1.007276470 u$
中子静止质量	$m_n = 1.6749543 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1.6749543 \times 10^{-24} \text{ g} = 1.008665012 u$
法拉第常数	$F = 9.648456 \times 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1} = 9.648456 \times 10^3 \text{ 电磁单位} \cdot \text{mol}^{-1}$ $= 2.8925342 \times 10^{14} \text{ 静电单位} \cdot \text{mol}^{-1}$
玻耳兹曼常数	$k = 1.380662 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} = 1.380662 \times 10^{-16} \text{ erg} \cdot \text{K}^{-1}$
引力常数	$G = 6.6720 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} = 6.6720 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{g}^{-1}$
标准大气压	$P_0 = 1.01325 \text{ bar} = 1033.2275 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$
水的三相点温度	$t_0 = 273.16 \text{ K} = 0.01^\circ \text{C}$
绝对零度	$T_0 = -273.15^\circ \text{C}$
热功当量	$J = 4.184 \text{ J} \cdot \text{cal}^{-1}$
理想气体标准状态摩尔体积	$V_m = 22.41383 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} = 22.41383 \times 10^3 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} = 22.41383 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$
克分子(摩尔)气体常数	$R = 8.31441 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = 8.31441 \times 10^7 \text{ erg} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
万有引力常数	$G = 6.6732 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$
第一辐射常数	$c_1 = (3.7417749 \pm 0.0000022) \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$
第二辐射常数	$c_2 = (1.438769 \pm 0.000012) \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$
康普顿波长电子	$\lambda_0 = 2.4263096 \times 10^{-12} \text{ m} = 2.4263096 \times 10^{-10} \text{ cm}$
质子	$\lambda_{0,p} = 1.3214409 \times 10^{-15} \text{ m} = 1.3214409 \times 10^{-13} \text{ cm}$
中子	$\lambda_{0,m} = 1.3196217 \times 10^{-15} \text{ m} = 1.3196217 \times 10^{-13} \text{ cm}$

附表4 长度换算

毫米 (mm)	厘米 (cm)	米 (m)*	公里 (km)	市尺	市里	英寸 (in)	英尺 (ft)	码 (yd)	英里 (mi)	国际哩(海里) n mile
1	0.1000	0.0010		0.0030		0.03937	0.003281			
10	1	0.0100		0.0300		0.3937	0.03281			
1000	100	1	0.0010	3	0.0020	39.3701	3.2808	1.0936	0.000621	0.0005396
		1000	1	3000	2		3280.833	1093.611	0.62144	0.5396
333.33	33.333	0.3333	0.00033	1	0.00067	13.1234	1.0936	0.3645		0.00018
		500	0.5000	1500	1		1640	546.80	0.3107	0.2698
25.4000	2.5400	0.0254		0.0762		1	0.0833	0.0278		
304.800	30.480	0.3048		0.9144		12	1	0.3333	0.00019	
	91.4402	0.9144	0.0009144	2.7432		36	3	1	0.00057	
		1609.344	1.6093	4828	3.2187		5280	1760	1	0.8681
		1852.0	1.8522		3.704					1

注：有*标记者为该物理量的法定单位符号。后同。

附表5 面积换算

平方毫米 (mm ²)	平方厘米 (cm ²)	平方米 (m ²)*	公顷 (a)	平方公里 (km ²)	平方 市尺	市亩	平方 市里	平方英寸 (sq·in)	平方英尺 (sq·ft)	英亩 (A)	平方英里 (sq·mi)
1	0.01	0.000001			0.000009			0.00155	0.00001076		
100	1	0.0001			0.0009			0.1550	0.001076		
1000000	10000	1	0.0100		9	0.0015		1550	10.7636	0.0002471	
		100	1	0.0001	900	0.1500	0.0004		1076.36	0.02471	
			10000	1	1500	4				247.1045	0.3861
	1111.11	0.1111			1	0.00017		172.23	1.1960		
		666.67	6.6667	0.000667	6000	1			7176	0.1647	0.00026
		250000	2500	0.2500	2250000	375	1			61.763	0.0965
645.160	6.4516	0.000645			0.0058			1	0.00694		
92903	929.03	0.0929			0.8361	0.0014		144	1		
		4046.7	40.467	0.004047	36422	6.0703			43560	1	0.0016
			25900	2.5900		3885	10.360			640	1

注：1公顷(ha) = 10²公顷(a) = 10⁴平方米(m²)。

附表6 体积、容积换算

立方厘米或毫 升(cm ³ , mL)	立方米 (m ³)*	升 (L)	立方 市尺	市升	立方英寸 (in ³)	立方英尺 (ft ³)	磅(水) (lb)	美液量加仑 (US·gal)	美干量 加仑	英制加仑 (Imp·gal)
1	0.000001	0.0010	0.0000271	0.0010	0.061024	0.0000353	0.002046	0.000265	0.000227	0.00022
1000000	1	1000	27	1000	61024	35.3147	2204.6	264.17	227	220.03
1000	0.0010	1	0.0270	1.0	61.024	0.0353	2.2046	0.2642	0.2270	0.2200
37037	0.0370	37.037	1	37.037	2260	1.3080	81.570	9.7841	8.4074	8.1515
1000	0.0010	1.0	0.0270	1	61.024	0.0353	2.2046	0.2642	0.2270	0.2200
16.3871	0.0000164	0.0164	0.00044	0.0164	1	0.00058	0.0362	0.0043	0.00372	0.0036
28317	0.02832	28.317	0.7646	28.317	1728	1	62.428	7.4805	6.4288	6.2288
453.6	0.0004536	0.4536	0.1225	0.4536	27.650	0.0160	1	0.1198	0.10297	0.0998
3785	0.003785	3.7853	0.1022	3.7853	231	0.1337	8.3455	1	0.8594	0.8327
		4.4048		4.4048	268.8		9.7108	1.1636	1	0.9689
4546	0.004546	4.5460	0.1227	4.5460	277.27	0.1605	10.022	1.2009	1.0321	1

注：1mL = 1cc。1L = 10³cm³。

附表 7 质量换算

克 (g)	千克 (公斤) (kg)*	吨 (t)	市两 (旧制)	市两	市斤	市担	克 (gr)	常衡盎司 (oz. av)	常 磅 (lb. av)	金衡磅 (lb. t)	美吨(短吨) (short tn)	英吨(长吨) (long tn)
1	0.0010	10 ⁻⁶	0.0320	0.0200	0.0020		15.4324	0.035274	0.0022046	0.0026792		
1000	1	0.0010	32	20	2	0.0200	15432.36	35.274	2.20462	2.6792	0.001102	0.000984
	1000	1	32000	20000	2000	20		35274	2204.62	2679.2285	1.1023	0.9842
31.250	0.0313		1	0.625	0.0625			1.1023	0.0689			
50	0.0500	0.00005	1.6000	1	0.1000	0.0010	771.6178	1.7637	0.11023	0.13396		
500	0.5000	0.0005	16	10	1	0.0100	7716.178	17.637	1.1023	1.3396	0.000551	0.000492
	50	0.0500	1600	1000	100	1		1763.7	110.231	133.96	0.0551	0.04921
0.0648			0.002074	0.0013			1	0.0023				
28.3495	0.0284		0.9072	0.5670	0.0567		437.5	1	0.0625	0.07596		
453.58	0.4536	0.0004536	14.515	9.072	0.9072	0.009072	7000	16	1	1.2153	0.0005	0.0004465
	0.3732	0.0003732		7.465	0.7465		5760	13.1657	0.8229	1	0.00041143	0.0003674
	907.19	0.9072	29030	18144	1814.37	18.1437		32000	2000	2430.5	1	0.8929
	1016.047	1.0160	32514	20321	2032.09	20.3209		35840	2240	2722.2	1.1200	1

注：日常生活和贸易活动中，质量习惯称重量，表示力的概念时，应称为重力。

附表 8 密度换算

克/厘米 ³ (g/cm ³) 或 吨/米 ³ (t/m ³)	公斤/米 ³ (kg/m ³) 或 克/升 (g/L)	磅/英寸 ³ (lb/in ³)	磅/英尺 ³ (lb/ft ³)	磅/英加仑 (lb/Imp. gal)	磅/美加仑 (lb/U. S. gal)
1	1000	0.03613	62.43	10.02	8.345
0.001	1	3.613×10^{-5}	0.06243	0.01002	0.00835
27.68	27680	1	1728	277.42	231
0.01602	16.02	0.00058	1	0.1605	0.1337
0.0998	99.8	0.0036	6.2288	1	0.8327
0.1198	119.8	0.004329	7.48	1.201	1

附表 9 比容换算

毫升每克 (mL/g)	立方厘米每克 (cm ³ /g)	立方米每千克 (m ³ /kg)	立方米每吨 (m ³ /t)	立方英寸每磅 (in ³ /lb)	立方英尺每磅 (ft ³ /lb)	美加仑每磅 (U. S. gal/lb)	英加仑每磅 (Imp. gal/lb)
1	1.00003	1.00003×10^{-3}	1.00003	27.68013	0.0160187	0.11983	0.99800
0.99997	1	10^{-3}	1	27.68013	0.0160185	0.11983	0.99800
9.9997×10^2	10^3	1	10^3	2.76801×10^4	1.60185	1.1983×10^2	9.9800×10^2
0.99997	1	10^{-3}	1	27.68013	0.0160185	0.11983	0.99800
0.0361265	0.036127	3.6127×10^{-5}	0.036127	1	5.7870×10^{-4}	4.3290×10^{-3}	3.6048×10^{-3}
62.4278	62.4278	0.0624278	62.4278	1.7280×10^3	1	7.48055	6.22898
8.347245	8.347245	8.34725×10^{-3}	8.347245	2.30995×10^2	0.133677	1	0.832709
10.02214	10.02214	1.0022×10^{-2}	10.02214	2.7741×10^2	0.16054	1.20094	1

附表 10 力、重力换算

牛 顿 (N)	公斤力 (kgf)	斯 坦 (Sn)	达 因 (dyn)	磅 力 (lbf)	磅 达 (pdl)
1	0.102	10^{-3}	10^5	0.2248	7.233
9.80665	1	9.80665×10^{-3}	9.80665×10	2.2046	70.93
10^3	10^2	1	10^8	224.8	7.233×10^3
10^{-5}	1.02×10^{-6}	10^{-8}	1	2.248×10^{-6}	7.233×10^{-5}
4.448	0.4536	4.448×10^{-3}	4.448×10^5	1	32.174
0.1383	1.41×10^{-2}	0.1383×10^{-3}	1.383×10^4	3.108×10^{-2}	1

注：有些国家用 K_p (Kilopond) 作为力的一种单位， $1K_p = 1$ 公斤力 (kgf)。

附表 11 压力、压强、应力换算

帕(斯卡) (Pa)	微巴 (μbar)	毫巴 (mbar)	巴 (bar)	公斤力/毫米 ² (kgf/mm^2)	工程大 气压 ^② (at)	毫米 水柱 (mmH_2O)	标准大气压 ^① (atm)	毫米 汞柱 (mmHg)	磅力/呎 ² (lbf/ft^2)	磅力/吋 ² (lbf/in^2)	吋水柱 (inH_2O)
1	10	0.01	10^{-5}	1.02×10^{-7}	1.02×10^{-5}	0.102	0.99×10^{-3}	0.0075	0.02089	14.5×10^{-5}	40.15×10^{-4}
0.1	1	0.001				0.0102					
100	1000	1	0.001			10.2		0.7501	2.089	0.0145	40.15×10^{-2}
10^5	10^6	1000	1	0.0102	1.02	10197	0.9869	750.1	2089	14.5	
98.07×10^5				1	100	10^6	96.78	73556		1422	
98067		98067	98.07	0.01	1	10^4	0.9678	735.6	2048	14.22	393.7
9.807	98.07	0.0981	0.9807		0.0001	1	0.9678×10^{-4}	0.0736	0.2048		39.37×10^{-3}
101325		1013	1.013		1.033	10332	1	760	2116	14.7	406.8
133.32	1333	1.333			0.00136	13.6	0.00132	1	2.785	0.01934	0.5354
47.88	478.8	0.4788		4.882×10^{-6}		4.882		0.3591	1	0.00694	0.192
6894.8	6894.8	68.95	0.06895	7.03×10^{-4}	0.0703	703	0.068	51.71	144	1	27.68
249.1		2.49			0.00254	25.4	0.00246	1.8676	5.20272	0.03613	1

1 毫米汞柱 (mmHg) = 1 托 (Torr) = 133.322Pa

1 磅达/呎² (pdl/ft²) = 1.488 牛顿/米² (N/m²)1 呎水柱 (ftH₂O) = 2989.07 牛顿/米² (N/m²)1 吋汞柱 (inHg) = 3386.39 牛顿/米² (N/m²)注: 1 帕斯卡 (Pa) = 1 牛顿/米² (N/m²)1 微巴 (μbar) = 1 达因/厘米² (dyn/cm²)1 毫米水柱 (mmH₂O) (4℃时) = 1 公斤力/米² (kgf/m²)1 工程大气压 (at) = 1 公斤力/厘米² (kgf/cm²)

① 标准大气压即物理大气压; ② 工程大气压 (at) 即绝对大气压。

附表 12 表面张力换算

达因每厘米 (dyn/cm)	克力每厘米 (gf/cm)	千克力每米 (kgf/m)	磅力每英尺 (lbf/ft)	牛顿每米 (N/m)*
1	1.0197×10^{-3}	1.0197×10^{-4}	6.853×10^{-5}	9.910×10^{-3}
980.665	1	0.1	0.06720	0.98067
9806.65	10	1	0.6720	9.8067
14592.15	14.88	1.488	1	14.5922
1×10^3	1.10197	0.10197	0.06853	1

附表 13 运动粘度换算

斯[托克斯] ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{St}$)	厘斯[托克斯] ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cst}$)	平方米每秒 ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)*	平方米每秒 ($\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	平方英尺每秒 ($\text{ft}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	平方英尺每时 ($\text{ft}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)
1	10^2	10^{-4}	0.3600	1.0764×10^{-3}	3.875
10^{-2}	1	10^{-6}	3.6×10^{-3}	1.0764×10^{-5}	3.875×10^{-2}
10^4	10^6	1	3.6×10^3	10.764	3.875×10^{-4}
2.778	2.778×10^2	2.778×10^{-4}	1	2.99×10^{-3}	10.7639
9.2903×10^2	9.2903×10^4	0.2903×10^{-2}	3.3445×10^2	1	3.6×10^3
0.2581	25.81	2.581×10^{-5}	0.2903×10^{-2}	2.778×10^{-4}	1

附表 14 动力粘度换算

公斤力·秒/米 ² ($\text{kgf} \cdot \text{s} / \text{m}^2$)	帕[斯卡]·秒 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)*	泊 (P)	公斤力·时/米 ² ($\text{kgf} \cdot \text{h} / \text{m}^2$)	牛顿·时/米 ² ($\text{N} \cdot \text{h} / \text{m}^2$)	磅力·秒/英尺 ² ($\text{lbf} \cdot \text{s} / \text{ft}^2$)
1	9.81	98.1	278×10^{-6}	2.73×10^{-3}	0.205
0.102	1	10	28.3×10^{-6}	278×10^{-6}	20.9×10^{-3}
10.2×10^{-3}	0.1	1	2.83×10^{-6}	27.8×10^{-6}	2.09×10^{-3}
3600	35.3×10^3	353×10^3	1	9.81	738
367	3600	36×10^3	0.102	1	75.3
4.88	47.88	478.8	1.356×10^{-3}	13.3×10^{-3}	1

附表 15 能量、功、热换算

尔格 (erg)	焦耳 (J)	公斤力·米 ($\text{kgf} \cdot \text{m}$)	米制马力·时 ($\text{PS} \cdot \text{h}$)	英制马力·时 ($\text{hp} \cdot \text{h}$)	千瓦·时 ($\text{kW} \cdot \text{h}$)	千卡 (kcal)	英热单位 (Btu)	英尺·磅力 ($\text{ft} \cdot \text{lbf}$)
1	10^{-7}	0.102×10^{-7}	37.77×10^{-15}	37.25×10^{-15}	27.78×10^{-15}	23.9×10^{-12}	94.78×10^{-12}	0.7376×10^{-7}
10^7	1	0.102	377.7×10^{-9}	372.5×10^{-9}	277.8×10^{-9}	239×10^{-6}	947.8×10^{-6}	0.7376
9.807×10^7	9.807	1	3.704×10^{-6}	3.653×10^{-6}	2.724×10^{-6}	2.342×10^{-3}	9.295×10^{-3}	7.233
26.48×10^{12}	2.648×10^6	270×10^3	1	0.9863	0.7355	632.5	2510	1.953×10^6
26.85×10^{12}	2.685×10^6	273.8×10^3	1.014	1	0.7457	641.2	2544.4	1.98×10^6
36×10^{12}	3.6×10^6	367.1×10^3	1.36	1.341	1	859.845	3412	2.655×10^6
41.87×10^9	4186.8	426.935	1.581×10^{-3}	1.559×10^{-3}	1.163×10^{-3}	1	3.968	3.087×10^3
10.55×10^9	1055.06	107.6	398.5×10^{-6}	393×10^{-6}	293×10^{-6}	0.252	1	778.2
1.356×10^7	1.356	0.1383	0.5121×10^{-6}	0.505×10^{-6}	0.3768×10^{-6}	0.324×10^{-3}	1.285×10^{-3}	1

注: 1 尔格 (erg) = 1 达因·厘米 (dyn·cm)

1 焦耳 (J) = 1 牛顿·米 (N·m) = 1 瓦·秒 (W·s)

1 英尺·磅达 (ft·pdl) = 0.04214 焦耳 (J)

1 电子伏 (eV) = 1.6022×10^{-19} 焦耳 (J)

附表 16 功率换算

尔格/秒 (erg/s)	瓦 (W)*	公斤力·米/秒 (kgf·m/s)	米制马力 (PS)	英制马力 (hp)	千瓦 (kW)	千卡/秒 (kcal/s)	英热单位/秒 (Btu/s)	英尺·磅力/秒 (ft·lbf/s)
1	10^{-7}	0.102×10^{-7}	0.136×10^{-9}	0.1341×10^{-9}	10^{-10}	23.9×10^{-2}	94.78×10^{-12}	0.7376×10^{-7}
10^7	1	0.102	1.36×10^{-3}	1.341×10^{-3}	10^{-3}	239×10^{-6}	947.8×10^{-6}	0.7376
9.807×10^7	9.807	1	13.33×10^{-3}	13.15×10^{-3}	9.807×10^{-3}	2.342×10^{-3}	9.295×10^{-3}	7.233
7.355×10^9	735.5	75	1	0.9863	0.7355	0.1757	0.6972	542.5
7.457×10^9	745.7	76.04	1.014	1	0.7457	0.1781	0.7068	550
10^{10}	1000	102	1.36	1.341	1	0.239	0.9478	737.6
41.87×10^9	4186.8	426.935	5.692	5.614	4.187	1	3.968	3087
10.55×10^9	1055.06	107.6	1.434	1.415	1.055	0.252	1	778.2
1.356×10^7	1.356	0.1383	1.843×10^{-3}	1.82×10^{-3}	1.356×10^{-3}	0.324×10^{-3}	1.285×10^{-3}	1

注: 1 瓦 (W) = 1 牛顿·米/秒 (N·m/s) = 1 焦耳/秒 (J/s)

1 英尺·磅达/秒 (ft·pdl/s) = 0.04214 牛顿·米/秒 (N·m/s)

附表 17 热导率 (导热系数) 换算

千卡/(米·时·℃) [kcal/(m·h·℃)]	卡/(厘米·秒·℃) [cal/(cm·s·℃)]	瓦/(米·℃) [W/(m·℃)]	焦耳/(厘米·秒·℃) [J/(cm·s·℃)]	英热单位/(英尺·时·°F) [Btu/(ft·h·°F)]
1	0.00278	1.16	0.0116	0.672
360	1	418.68	4.1868	242
0.8598	0.00239	1	0.01	0.578
8598	0.239	100	1	57.8
1.49	0.00413	1.73	0.0173	1

附表 18 传热系数换算

千卡/(米 ² ·时·℃) [kcal/(m ² ·h·℃)]	卡/(厘米 ² ·秒·℃) [cal/(cm ² ·s·℃)]	焦耳/(厘米 ² ·秒·℃) [J/(cm ² ·s·℃)]	英热单位/(英尺 ² ·时·°F) [Btu/(ft ² ·h·°F)]
1	2.778×10^{-5}	1.163×10^{-4}	0.204816
36000	1	4.1868	7373
8598.45	0.2388	1	1761
4.882	1.356×10^{-4}	5.678×10^{-4}	1

附表 19 导温系数换算

米 ² /时 (m ² /h)	米 ² /秒 (m ² /s)	英尺 ² /时 (ft ² /h)	英寸 ² /秒 (in ² /s)	英尺 ² /秒 (ft ² /s)
1	2.7778×10^{-4}	10.7639	0.43059	2.9900×10^{-3}
3.600×10^3	1	3.8750×10^4	1.550×10^3	10.7639
0.092903	2.5806×10^{-5}	1	0.04000	2.7778×10^{-4}
2.32258	6.4516×10^{-4}	25.000	1	6.944×10^{-3}
3.3444×10^2	0.09290	3.5999×10^3	144	1

附表 20 热容、熵换算

焦耳每摄氏度 (J/°C)	千卡每摄氏度 (kcal/°C)	千克米每摄氏度 (kgm/°C)	焦耳每华氏度 (J/°F)	英热单位每华氏度 (Btu/°F)	英尺磅每华氏度 (ft·lb/°F)
1	2.38846×10^{-4}	0.101972	0.02959	1.0834×10^{-4}	0.08431
4.1868×10^3	1	4.26936×10^2	1.23887×10^2	0.45360	3.52947×10^2
9.80665	2.34228×10^{-3}	1	0.290177	1.06245×10^{-3}	0.826693
33.79541	8.07190×10^{-3}	3.44617	1	3.6614×10^{-3}	2.84894
9.23020×10^3	2.20460	9.41219×10^2	2.73120×10^2	1	7.78102×10^2
11.86248	2.8333×10^{-3}	1.20964	0.351008	1.28518×10^{-3}	1

附表 21 比热容、比熵换算

焦耳·每千克 摄氏度 (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	焦耳每克摄氏度 (J·g ⁻¹ ·°C ⁻¹)	千卡每千克摄氏度 (kcal·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	千克·米每千克 摄氏度 (kg·m·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	英热单位每磅华氏度 (Btu·lb ⁻¹ ·°F ⁻¹)	英尺·磅每磅华氏度 (ft·lb·lb ⁻¹ ·°F ⁻¹)
1	10^{-3}	2.38846×10^{-4}	0.101972	2.38846×10^{-4}	0.185863
10^3	1	0.238846	1.01972×10^2	0.238846	1.85863×10^2
4.1868×10^3	4.1868	1	4.26935×10^2	1	7.78169×10^2
9.80665	9.80665×10^{-3}	2.34228×10^{-3}	1	2.34228×10^{-3}	1.82269
4.1868×10^3	4.1868	1	4.26935×10^2	1	7.78169×10^2
5.38032	5.38032×10^{-3}	1.28507×10^{-3}	0.54864	1.28507×10^{-3}	1

附表 22 比潜热、比焓换算

焦耳每克 (J/g)	千卡每千克 (kcal/kg)	千克·米每千克 (kg·m/kg)	英热单位每磅 (Btu/lb)	英尺·磅每磅 (ft·lb/lb)
1	0.2389	1.0197×10^2	0.4299	3.3455×10^2
4.1868	1	4.2694×10^2	1.8	1.4007×10^3
9.8067×10^{-3}	2.3423×10^{-3}	1	4.2161×10^{-3}	3.2808
2.326	0.5556	2.3719×10^2	1	7.7817×10^2
2.9891×10^{-3}	7.1393×10^{-4}	0.3048	1.2851×10^{-3}	1

附表 23 摄氏温度与华氏温度换算表

℃	°F	℃	°F	℃	°F	℃	°F
-273	-459.4	5	41.0	42	107.6	79	174.2
-270	-454	6	42.8	43	109.4	80	176.0
-260	-436	7	44.6	44	111.2	81	177.8
-250	-418	8	46.4	45	113.0	82	179.6
-240	-400	9	48.2	46	114.8	83	181.4
-230	-382	10	50.0	47	116.6	84	183.2
-220	-364	11	51.8	48	118.4	85	185.0
-210	-346	12	53.6	49	120.2	86	186.8
-200	-328	13	55.4	50	120.0	87	188.6
-190	-310	14	57.2	51	123.8	88	190.4
-180	-292	15	59.0	52	125.6	89	192.2
-170	-274	16	60.8	53	127.4	90	194.0
-160	-256	17	62.6	54	129.2	91	195.8
-150	-238	18	64.4	55	131.0	92	197.6
-140	-220	19	66.2	56	132.8	93	199.4
-130	-202	20	68.0	57	134.6	94	201.1
-120	-184	21	69.8	58	136.4	95	203.0
-110	-166	22	71.6	59	138.2	96	204.8
-100	-148	23	73.4	60	140.0	97	206.6
-90	-130	24	75.2	61	141.8	98	208.4
-80	-112	25	77.0	62	143.6	99	210.2
-70	-94	26	78.8	63	145.4	100	212.0
-60	-76	27	80.6	64	147.2	100	212
-50	-58	28	82.4	65	149.0	110	230
-40	-40	29	84.2	66	150.8	120	248
-30	-22	30	86.0	67	152.6	130	266
-20	-4	31	87.8	68	154.4	140	284
-18	-0.4	32	89.6	69	156.2	150	302
-16	1.8	38	91.4	70	158.0	160	320
-14	5.4	34	93.2	71	159.8	180	356
-12	9	35	95.0	72	161.6	190	374
-10	14	36	96.8	73	163.4	200	392
0	32	37	98.6	74	165.2	210	410
1	33.8	38	100.4	75	167.0	212	413
2	35.6	39	102.2	76	168.8	220	428
3	37.4	40	104.0	77	170.6	230	446
4	39.2	41	105.8	78	172.4	240	464

(续)

℃	°F	℃	°F	℃	°F	℃	°F
250	482	630	1166	1000	1832	1370	2498
260	500	640	1184	1010	1850	1380	2516
270	518	650	1202	1020	1868	1390	2534
280	536	660	1220	1030	1886	1400	2552
290	554	670	1238	1040	1904	1410	2570
300	572	680	1256	1050	1922	1420	2588
310	590	690	1274	1060	1940	1480	2606
320	608	700	1292	1070	1958	1440	2624
330	626	710	1310	1080	1976	1450	2642
340	644	720	1328	1090	1994	1460	2660
350	662	730	1346	1100	2012	1470	2678
360	680	740	1364	1110	2030	1480	2696
370	698	750	1382	1120	2048	1490	2714
380	716	760	1400	1130	2066	1500	2732
390	734	770	1418	1140	2084	1510	2750
400	752	780	1436	1150	2102	1520	2768
410	770	790	1454	1160	2120	1530	2786
420	788	800	1472	1170	2138	1540	2804
430	806	810	1490	1180	2156	1550	2822
440	824	820	1508	1190	2174	1560	2840
450	842	830	1526	1200	2192	1570	2858
460	860	840	1544	1210	2210	1580	2876
470	878	850	1562	1220	2228	1590	2894
480	896	860	1580	1230	2246	1600	2912
490	914	870	1598	1240	2264	1610	2930
500	932	880	1616	1250	2282	1620	2948
510	950	890	1634	1260	2300	1630	2966
520	968	900	1652	1270	2318	1640	2984
540	1004	910	1670	1280	2336	1650	3002
550	1022	920	1688	1290	2354	1660	3020
560	1040	930	1706	1300	2372	1670	3038
570	1058	940	1724	1310	2390	1680	3056
580	1076	950	1742	1320	2408	1690	3074
590	1094	960	1760	1330	2426	1700	3092
600	1112	970	1778	1340	2444	1710	3110
610	1130	980	1796	1350	2462	1720	3128
620	1148	990	1814	1360	2480	1730	3146

(续)

℃	°F	℃	°F	℃	°F	℃	°F
1740	3164	2060	3740	2380	4316	2700	4892
1750	3182	2070	3758	2390	4334	2710	4910
1760	3200	2080	3776	2400	4352	2720	4928
1770	3218	2090	3794	2410	4370	2730	4946
1780	3236	2100	3812	2420	4388	2740	4964
1790	3254	2110	3830	2430	4406	2750	4972
1800	3272	2120	3848	2440	4424	2760	5000
1810	3290	2130	3866	2450	4442	2770	5018
1820	3308	2140	3884	2460	4460	2780	5036
1830	3326	2150	3902	2470	4478	2790	5054
1840	3340	2160	3920	2480	4496	2800	5072
1850	3362	2170	3938	2490	4514	2810	5090
1860	3380	2180	3956	2500	4532	2820	5108
1870	3398	2190	3974	2510	4550	2830	5126
1880	3416	2200	3992	2520	4568	2840	5144
1890	3434	2210	4010	2530	4586	2850	5162
1900	3452	2220	4028	2540	4604	2860	5180
1910	3470	2230	4046	2550	4622	2870	5198
1920	3488	2240	4064	2560	4640	2880	5216
1930	3506	2250	4082	2570	4658	2890	5234
1940	3524	2260	4100	2580	4676	2900	5252
1950	3542	2270	4118	2590	4694	2910	5270
1960	3560	2280	4136	2600	4712	2920	5288
1970	3578	2290	4154	2610	4730	2930	5306
1980	3596	2300	4172	2620	4748	2940	5324
1990	3614	2310	4190	2630	4766	2950	5342
2000	3632	2320	4208	2640	4784	2960	5360
2010	3650	2330	4226	2650	4802	2970	5378
2020	3668	2340	4244	2660	4820	2980	5396
2030	3686	2350	4262	2670	4838	2990	5414
2040	3704	2360	4280	2680	4856	3000	5432
2050	3722	2370	4298	2690	4874		

附表 24 铝合金 HBS10D² 为首列硬度与强度换算

硬 度								抗拉强度 σ_b /MPa						
布 氏		维氏	洛氏		表面洛氏			退火、淬火人工时效				淬火自然时效		变形 铝合 金
$P = 10D^2$		HV	HRB	HRF	HR15T	HR30T	HR45T	LY11 LY12	LC4	LD5	LD10	LY11 LY12	LD5 LD10	
HBS	$d_{10}、2d_5、4d_{2.5}, \text{mm}$													
55.0	4.670	56.1		52.5	62.3	17.6		197	207	208	207			215
56.0	4.631	57.1		53.7	62.9	18.8		201	209	209	209			218
57.0	4.592	58.2		55.0	63.5	20.2		204	212	211	211			221
58.0	4.555	59.8		56.2	64.1	21.5		208	216	215	215			224
59.0	4.518	60.4		57.4	64.7	22.8		211	220	219	219			227
60.0	4.483	61.5		58.6	65.3	24.1		215	225	223	223			230
61.0	4.448	62.6		59.7	65.9	25.2		218	230	228	229			233
62.0	4.414	63.6		60.9	66.4	26.5		222	235	233	234			235
63.0	4.381	64.7		62.0	67.0	27.7		225	240	239	240			238
64.0	4.348	65.8		63.1	67.5	28.9		229	246	245	246			241
65.0	4.316	66.9	6.9	64.2	68.1	30.0		232	252	251	252			244
66.0	4.285	68.0	8.8	65.2	68.6	31.5		236	257	257	258			247
67.0	4.254	69.1	10.8	66.3	69.1	32.3		239	263	263	263			250
68.0	4.225	70.1	12.7	67.3	69.6	33.4		243	269	269	269			253
69.0	4.195	71.2	14.6	68.3	70.1	34.4		246	274	274	275			256
70.0	4.167	72.3	16.5	69.3	70.6	35.5		250	279	280	280			259
71.0	4.139	73.4	18.2	70.2	71.0	36.5	0.8	253	284	285	285			263
72.0	4.111	74.5	20.0	71.1	71.5	37.4	2.3	257	289	291	290			266
73.0	4.084	75.6	21.9	72.1	72.0	38.5	3.9	260	294	295	295			269
74.0	4.058	76.7	23.4	72.9	72.3	39.3	5.2	264	298	300	299			272
75.0	4.032	77.7	25.1	73.8	72.8	40.3	6.7	267	302	305	303			275
76.0	4.006	78.8	26.8	74.7	73.2	41.3	8.2	271	306	309	307			278
77.0	3.981	79.9	28.3	75.5	73.6	42.1	9.5	274	310	312	310			281
78.0	3.957	81.0	29.8	76.3	74.0	43.0	10.8	278	313	316	314			285
79.0	3.933	82.1	31.3	77.1	74.4	43.8	12.1	281	316	319	317			288
80.0	3.909	83.2	32.9	77.9	74.8	44.7	13.4	285	319	322	319			291
81.0	3.886	84.2	34.2	78.6	75.2	45.4	14.6	288	322	325	322			294
82.0	3.863	85.3	35.5	79.3	75.5	46.2	15.7	292	325	327	324			298
83.0	3.841	86.4	36.9	80.0	75.8	46.9	16.9	295	327	329	326			301
84.0	3.819	87.5	38.2	80.7	76.2	47.7	18.0	299	330	331	328			304
85.0	3.797	88.6	39.5	81.4	76.5	48.4	19.2	302	332	333	330			307
86.0	3.776	89.7	40.8	82.1	76.9	49.2	20.3	306	334	334	332			311
87.0	3.755	90.7	42.0	82.7	77.2	49.8	21.3	309	336	336	334			314
88.0	3.734	91.8	43.1	83.3	77.5	50.4	22.3	313	337	337	335			317
89.0	3.714	92.9	44.3	83.9	77.8	51.1	23.3	316	339	338	337			321

(续)

硬 度								抗拉强度 σ_b /MPa						
布 氏		维氏	洛氏		表面洛氏			退火、淬火人工时效				淬火自然时效		变形 铝合 金
$P \approx 10D^2$		HV	HRB	HRF	HR15T	HR30T	HR45T	2A11	7A04 (LC4)	2A50 (LD5)	2A14 (LD10)	2A11	2A50	
HBS	$d_{10}, 2d_5, 4d_{2.5}, \text{mm}$							(LY11)				(LY11)	(LD5)	
								2A12 (LY12)				2A12 (LY12)	2A14 (LD10)	
90.0	3.694	94.0	45.4	84.5	78.1	51.7	24.2	320	341	339	338	351	414	324
91.0	3.675	95.1	46.5	85.1	78.3	52.4	25.2	323	342	340	340	357	417	328
92.0	3.655	96.2	47.7	85.7	78.6	53.0	26.2	327	344	341	341	363	421	331
93.0	3.636	97.2	48.6	86.2	78.9	53.5	27.0	330	346	342	343	368	425	335
94.0	3.618	98.3	49.6	86.7	79.1	54.1	27.9	334	347	343	345	374	429	338
95.0	3.599	99.4	50.7	87.3	79.4	54.7	28.8	337	349	345	346	379	433	341
96.0	3.581	100.5	51.7	87.8	79.7	55.2	29.7	341	350	346	348	385	436	345
97.0	3.563	101.6	52.6	88.3	79.9	55.8	30.5	344	352	347	350	390	440	349
98.0	3.545	102.7	53.4	88.7	80.1	56.2	31.1	348	354	349	352	396	444	352
99.0	3.528	103.7	54.3	89.2	80.4	56.7	32.0	351	356	351	354	402	448	356
100.0	3.511	104.8	55.3	89.7	80.6	57.3	32.8	355	358	353	357	407	451	359
101.0	3.494	105.9	56.0	90.1	80.8	57.7	33.4	358	360	355	359	413	455	363
102.0	3.478	107.0	57.0	90.6	81.1	58.2	34.3	362	362	357	362	418	459	366
103.0	3.461	108.1	57.7	91.0	81.2	58.6	34.9	365	365	360	364	424	463	370
104.0	3.445	109.2	58.5	91.4	81.4	59.1	35.6	369	367	363	367	429	466	374
105.0	3.429	110.2	59.3	91.8	81.6	59.5	36.2	372	370	366	370	435	470	377
106.0	3.413	111.1	60.0	92.2	81.8	59.9	36.9	376	372	370	373	441	474	381
107.0	3.398	112.4	60.8	92.6	82.0	60.4	37.5	379	375	373	376	446	479	385
108.0	3.383	113.5	61.5	93.0	82.2	60.8	38.2	383	378	377	379	452	482	388
109.0	3.367	114.6	62.3	93.4	82.4	61.2	38.8	386	381	382	383	457	485	392
110.0	3.353	115.7	63.1	93.8	82.6	61.6	39.5	390	385	386	386	463	489	396
111.0	3.338	116.7	63.6	94.1	82.8	62.0	40.0	393	388	391	390	468	493	400
112.0	3.323	117.8	64.4	94.5	83.0	62.4	40.7	397	391	396	394	474	497	403
113.0	3.309	118.9	65.0	94.8	83.1	62.7	41.1	400	395	402	397	480	500	407
114.0	3.295	120.0	65.7	95.2	83.3	63.1	41.8	404	399	407	401	485	504	411
115.0	3.281	121.1	66.3	95.5	83.5	63.5	42.3	407	403	413	405	491	508	415
116.0	3.267	122.2	67.0	95.9	83.7	63.9	43.0	411	407	419	409	496	512	419
117.0	3.254	123.2	67.6	96.2	83.8	64.2	43.4	414	411	425	413	502	516	422
118.0	3.240	124.3	68.2	96.5	84.0	64.5	43.9	418	415	432	417	507	519	426
119.0	3.227	125.4	68.8	96.8	84.1	64.8	44.4	421	419	438	421	513	523	430
120.0	3.214	126.5	69.3	97.1	84.2	65.2	44.9	425	423	444	425	519	527	434
121.0	3.201	127.6	69.9	97.4	84.4	65.5	45.4	428	427	451	429	524	531	438
122.0	3.188	128.7	70.6	97.8	84.6	65.9	46.1	432	431	457	432	530	534	442
123.0	3.175	129.7	71.2	98.1	84.7	66.2	46.6	435	435	464	436	535	538	446
124.0	3.163	130.8	71.6	98.3	84.8	66.4	46.9	439	440	470	440	540	542	450

(续)

硬 度								抗拉强度 σ_b /MPa						
布 氏		维氏	洛氏		表面洛氏			退火、淬火人工时效				淬火自然时效		变形 铝合 金
$P = 10D^2$		HV	HRB	HRF	HR15T	HR30T	HR45T	2A11	7A04	2A50	2A14	2A11	2A50	
HBS	$d_{10}、2d_5、$ $4d_{2.5}, \text{mm}$							(LY11)	(LC4)	(LD5)	(LD10)	(LY11)	(LD5)	
								2A12 (LY12)				2A12 (LY12)	2A14 (LD10)	
125.0	3.151	131.9	72.2	98.6	85.0	66.8	47.4	442	444	476	444	546	546	454
126.0	3.138	133.0	72.7	98.9	85.1	67.1	47.9	446	448	482	448	552	550	458
127.0	3.126	134.1	73.3	99.2	85.3	67.4	48.4	449	452	488	452	558	553	462
128.0	3.114	135.2	73.9	99.5	85.4	67.7	48.9	453	457	493	455	563	557	466
129.0	3.103	136.2	74.4	99.8	85.6	68.0	49.3	456	461	498	459	569	561	470
130.0	3.091	137.3	74.8	100.0	85.7	68.3	49.7	460	465	503	463	574	565	474
131.0	3.079	138.4	75.4	100.3	85.8	68.6	50.2	463	469	507	467	580		478
132.0	3.068	139.5	76.0	100.6	86.0	68.9	50.7	467	473	511	471	585		482
133.0	3.057	140.6	76.3	100.8	86.1	69.1	51.0	470	477	514	474	591		486
134.0	3.046	141.7	76.9	101.1	86.2	69.4	51.5	474	480	517	478	597		491
135.0	3.035	142.7	77.3	101.3	86.3	69.6	51.8	477	484	519	483	602		495
136.0	3.024	143.8	77.9	101.6	86.5	70.0	52.3	481	488	521	487	608		499
137.0	3.013	144.9	78.2	101.8	86.6	70.2	52.6	484	491	522	491	613		503
138.0	3.002	146.0	78.8	102.1	86.7	70.5	53.1	488	495	523	496	619		507
139.0	2.992	147.1	79.2	102.3	86.8	70.7	53.5	491	498		501			512
140.0	2.981	148.2	79.8	102.6	87.0	71.0	53.9	495	502		506			516
141.0	2.971	149.2	80.1	102.8	87.1	71.2	54.3	498	505		511			520
142.0	2.961	150.3	80.5	103.0	87.2	71.5	54.6	502	509		517			524
143.0	2.951	151.4	81.1	103.3	87.3	71.8	55.1	505	512		524			529
144.0	2.940	152.5	81.5	103.5	87.4	72.0	55.4	509	515		530			533
145.0	2.931	153.6	81.9	103.7	87.5	72.2	55.7	512	519		538			537
146.0	2.921	154.7	82.2	103.9	87.6	72.4	56.1	516	522		546			542
147.0	2.911	155.7	82.6	104.1	87.7	72.6	56.4	519	526		555			546
148.0	2.901	156.8	83.0	104.3	87.8	72.8	56.7	523	529		564			550
149.0	2.892	157.9	83.4	104.5	87.9	73.1	57.1	526	533		575			555
150.0	2.882	159.0	83.9	104.8	88.0	73.4	57.6	530	537		586			559
151.0	2.873	160.1	84.3	105.0	88.1	73.6	57.9	533	541					
152.0	2.864	161.2	84.7	105.2	88.2	73.8	58.2	537	545					
153.0	2.855	162.2	85.1	105.4	88.3	74.0	58.5	540	550					
154.0	2.846	163.3	85.5	105.6	88.4	74.2	58.9	544	554					
155.0	2.837	164.4	85.8	105.8	88.5	74.4	59.2	547	559					
156.0	2.828	165.5	86.2	106.0	88.6	74.7	59.5	551	564					
157.0	2.819	166.6	86.6	106.2	88.7	74.9	59.9	554	570					
158.0	2.810	167.7	86.8	106.3	88.8	75.0	60.0	558	576					
159.0	2.801	168.7	87.2	106.5	88.9	75.2	60.3	561	582					

(续)

硬 度								抗拉强度 σ_b /MPa						
布 氏		维氏	洛氏		表面洛氏			退火、淬火人工时效				淬火自然时效		变形铝合金
$P = 10D^2$		HV	HRB	HRF	HR15T	HR30T	HR45T	2A11	7A04	2A50	2A14	2A11	2A50	
HBS	$d_{10}、2d_5、4d_{2.5}, \text{mm}$							(LY11)	(LC4)	(LD5)	(LD10)	(LY11)	(LD5)	
								2A12 (LY12)				2A12 (LY12)	2A14 (LD10)	
160.0	2.793	169.8	87.5	106.7	89.0	75.4	60.7	56.5	58.8					
161.0	2.784	170.9	87.9	106.9	89.1	75.6	61.0		59.5					
162.0	2.776	172.0	88.3	107.1	89.2	75.8	61.3		60.2					
163.0	2.767	173.1	88.7	107.3	89.3	76.0	61.7		61.0					
164.0	2.759	174.2	89.3	107.6	89.4	76.4	62.1		61.7					
165.0	2.751	175.2	89.6	107.8	89.5	76.6	62.5		625					
166.0	2.743	176.3	90.0	108.0	89.6	76.8	62.8		634					
167.0	2.735	177.4	90.4	108.2	89.7	77.0	63.1		643					
168.0	2.727	178.5	90.8	108.4	89.8	77.2	63.5		651					
169.0	2.719	179.6	91.3	108.7	90.0	77.5	64.0		660					
170.0	2.711	180.7	91.7	108.9	90.1	77.8	64.3		669					

附表 25 洛氏、布氏、维氏、努氏硬度换算

洛 氏 硬 度					HV 10	HN 0.5 ^①	HBS 3000kg
HRC	HRA	HR15T	HR30T	HR45T			
80	92.0	96.5	92.0	87.0	1865	—	—
79	91.5	—	91.5	86.5	1787	—	—
78	91.0	96.0	91.0	85.5	1710	—	—
77	90.5	—	90.5	84.5	1633	—	—
76	90.0	95.5	90.0	83.5	1556	—	—
75	89.5	—	89.0	82.5	1478	—	—
74	89.0	95.0	88.5	81.5	1400	—	—
73	88.5	—	88.0	80.5	1323	—	—
72	88.0	94.5	87.0	79.5	1245	—	—
71	87.0	—	86.5	78.5	1160	—	—
70	86.5	94.0	86.0	77.5	1076	972	—
69	86.0	93.5	85.0	76.5	1004	946	—
68	85.5	—	84.5	75.5	942	920	—
67	85.0	83.0	83.5	74.5	894	895	—
66	84.5	92.5	83.0	73.0	854	870	—
65	84.0	92.0	82.0	72.0	820	846	—
64	83.5	—	81.0	71.0	789	822	—
63	83.0	91.5	80.0	70.0	763	799	—
62	82.5	91.0	79.0	69.0	739	776	—
61	81.5	90.5	78.5	67.5	716	754	—

(续)

洛氏硬度					HV 10	HN 0.5 ^①	HBS 3000kg
HRC	HRA	HR15T	HR30T	HR45T			
60	81.0	90.0	77.5	66.5	695	732	614
59	80.5	89.5	76.5	65.5	675	710	600
58	80.0	—	75.5	64.0	655	690	587
57	79.5	89.0	75.0	63.0	636	670	573
56	79.0	88.5	74.0	62.0	617	650	560
55	78.5	88.0	73.0	61.0	598	630	547
54	78.0	87.5	72.0	59.5	580	612	534
53	77.5	87.0	71.0	58.5	562	594	522
52	77.0	86.5	70.5	57.5	545	576	509
51	76.5	86.0	69.5	56.0	528	558	496
50	76.0	85.5	68.5	55.0	513	542	484
49	75.5	85.0	67.5	54.0	498	526	472
48	74.5	84.5	66.5	52.5	485	510	460
47	74.0	84.0	66.0	51.5	471	495	448
46	73.5	83.5	65.0	50.0	458	480	237
45	73.0	83.0	64.0	49.0	446	466	426
44	72.5	82.5	63.0	48.0	435	452	415
43	72.0	82.0	62.0	46.5	424	438	404
42	71.5	81.5	61.5	45.5	413	426	393
41	71.0	81.0	60.5	44.5	403	414	382
40	70.5	80.5	59.5	43.0	393	402	372
39	70.0	80.0	58.5	42.0	383	391	362
38	69.5	79.5	57.5	41.0	373	380	352
37	69.0	79.0	56.5	39.5	363	370	342
36	68.5	78.5	56.0	38.5	353	360	332
35	68.0	78.0	55.0	37.0	343	351	322
34	67.5	77.0	54.0	36.0	334	342	313
33	67.0	76.5	53.0	35.0	325	334	305
32	66.5	76.0	52.0	33.5	317	326	297
31	66.0	75.5	51.5	32.5	309	318	290
30	65.5	75.0	50.5	31.5	301	311	283
29	65.0	74.5	49.5	30.0	293	304	276
28	64.5	74.0	48.5	29.0	285	297	270
27	64.0	73.5	47.5	28.0	278	290	265
26	63.5	72.5	47.0	26.5	271	284	260
25	63.0	72.0	46.5	25.5	264	278	255
24	62.5	71.5	45.0	24.0	257	272	250
23	62.0	71.0	44.0	23.0	251	266	245
22	61.5	70.5	43.0	22.0	246	261	240
21	61.0	70.0	42.5	20.5	241	256	235
20	60.5	69.5	41.5	19.5	236	251	230

① 努氏硬度(Knoop), 载荷为 500g 或稍高。

附表 26 DVM, ISO-V, ISO-U 冲击值的 kgf·m, ft·lb, J 换算值

$$1\text{J} = 0.10197\text{kgf}\cdot\text{m} = 0.73756\text{ft}\cdot\text{lb}$$

$$1\text{J} = 0.14567\text{kgf}/\text{cm}^2$$

$$1\text{J} = 0.12746\text{kgf}/\text{cm}^2 = 5.94806\text{ft}\cdot\text{lb}/\text{sq}\cdot\text{inch}$$

$$1\text{J} = 0.20394\text{kgf}/\text{cm}^2 = 9.51690\text{ft}\cdot\text{lb}/\text{sq}\cdot\text{inch}$$

用 DVM-试棒

用 ISO-V-试棒

用 ISO-U-试棒

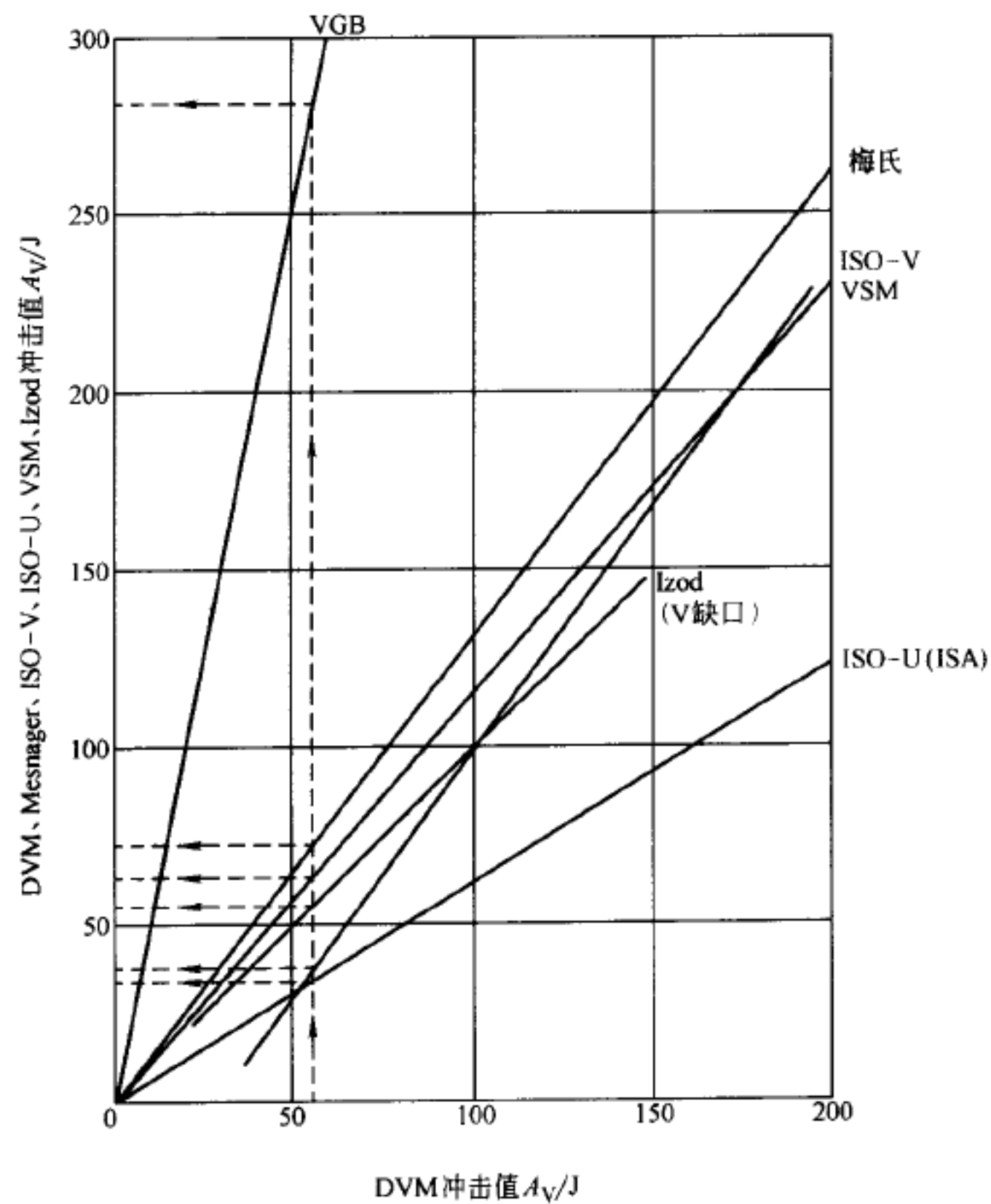
J	kgf·m	ft·lb	kgf/cm ²			ft·lb./sq. inch	
			DVM	ISO-V	ISO-U	ISO-V	ISO-U
2	0.20	1.48	0.3	0.3	0.4	12	19
4	0.41	2.95	0.6	0.5	0.8	24	38
6	0.61	4.43	0.9	0.8	1.2	36	57
8	0.82	5.90	1.2	1.0	1.6	48	76
10	1.02	7.38	1.5	1.3	2.0	59	95
12	1.22	8.85	1.7	1.5	2.4	71	114
14	1.43	10.33	2.0	1.8	2.9	83	133
16	1.63	11.80	2.3	2.0	3.3	95	152
18	1.84	13.28	2.6	2.3	3.7	107	171
20	2.04	14.75	2.9	2.5	4.1	119	190
22	2.24	16.23	3.2	2.8	4.5	131	209
24	2.45	17.70	3.5	3.1	4.9	143	228
26	2.65	19.18	3.8	3.3	5.3	155	247
28	2.86	20.65	4.1	3.6	5.7	167	266
30	3.06	22.13	4.4	3.8	6.1	178	286
32	3.26	23.60	4.7	4.1	6.5	190	305
34	3.47	25.08	5.0	4.3	6.9	202	324
36	3.67	26.55	5.2	4.6	7.3	214	343
38	3.87	28.03	5.5	4.8	7.7	226	362
40	4.08	29.50	5.8	5.1	8.2	238	381
42	4.28	30.98	6.1	5.4	8.6	250	400
44	4.49	32.45	6.4	5.6	9.0	262	419
46	4.69	33.93	6.7	5.9	9.4	274	438
48	4.89	35.40	7.0	6.1	9.8	286	457
50	5.10	36.88	7.3	6.4	10.2	297	476
52	5.30	38.35	7.6	6.6	10.6	309	495
54	5.51	39.83	7.9	6.9	11.0	321	514
56	5.71	41.30	8.2	7.1	11.4	333	533
58	5.91	42.78	8.4	7.4	11.8	345	552
60	6.12	44.25	8.7	7.6	12.2	357	571
62	6.32	45.73	9.0	7.9	12.6	369	590
64	6.53	47.20	9.3	8.2	13.1	381	609
66	6.73	48.68	9.6	8.4	13.5	393	628
68	6.93	50.15	9.9	8.7	13.9	404	647
70	7.14	51.63	10.2	8.9	14.3	416	666
72	7.34	53.10	10.5	9.2	14.7	428	685
74	7.55	54.58	10.8	9.4	15.1	440	704
76	7.75	56.05	11.1	9.7	15.5	452	723

(续)

J	kgm	ft. lb	kgm/cm ²			ft. lb./sq. inch	
			DVM	ISO-V	SIO-U	ISO-V	ISO-U
78	7.95	57.53	11.4	9.9	15.9	464	742
80	8.16	59.00	11.7	10.2	16.3	476	761
82	8.36	60.48	11.9	10.5	16.7	488	780
84	8.57	61.96	12.2	10.7	17.1	500	799
86	8.77	63.43	12.5	11.0	17.5	512	818
88	8.97	64.91	12.8	11.2	17.9	523	837
90	9.18	66.38	13.1	11.5	18.4	535	857
92	9.38	67.86	13.4	11.7	18.8	547	876
94	9.59	69.33	13.7	12.0	19.2	559	895
96	9.79	70.81	14.0	12.2	19.6	571	914
98	9.99	72.28	14.3	12.5	20.0	583	933
100	10.20	73.76	14.6	12.7	20.4	595	952
102	10.40	75.23	14.9	13.0	20.8	607	971
104	10.60	76.71	15.1	13.3	21.2	619	990
106	10.81	78.18	15.4	13.5	21.6	630	1009
108	11.01	79.66	15.7	13.8	22.0	642	1028
110	11.22	81.10	16.0	14.0	22.4	654	1047
112	11.42	82.61	16.3	14.3	22.8	666	1066
114	11.62	84.08	16.6	14.5	23.2	678	1085
116	11.83	85.56	16.9	14.8	23.7	690	1104
118	12.03	87.03	17.2	15.0	24.1	702	1123
120	12.24	88.51	17.5	15.3	24.5	714	1142
122	12.44	89.98	17.8	15.6	24.9	726	1161
124	12.64	91.46	18.1	15.8	25.3	738	1180
126	12.85	92.93	18.4	16.1	25.7	749	1199
128	13.05	94.41	18.6	16.3	26.1	761	1218
130	13.26	95.88	18.9	16.6	26.5	773	1237
132	13.46	97.36	19.2	16.8	26.9	785	1256
134	13.66	98.83	19.5	17.1	27.3	797	1275
136	13.87	100.31	19.8	17.3	27.7	809	1294
138	14.07	101.78	20.1	17.6	28.1	821	1313
140	14.28	103.26	20.4	17.8	28.6	833	1332
142	14.48	104.73	20.7	18.1	29.0	845	1351
144	14.68	106.21	21.0	18.4	29.4	857	1370
146	14.89	107.68	21.3	18.6	29.8	868	1389
148	15.09	109.16	21.6	18.9	30.2	880	1409
150	15.30	110.63	21.9	19.1	30.6	892	1428
152	15.50	112.11	22.1	19.4	31.0	904	1447
154	15.70	113.58	22.4	19.6	31.4	916	1466
156	15.91	115.06	22.7	19.9	31.8	928	1485
158	16.11	116.53	23.0	20.1	32.2	940	1504
160	16.32	118.01	23.3	20.4	32.6	952	1523

注：引自 Stahlschlüssel-Taschenbuch, Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH-D-7142 Marbach/n 1992。

DVM冲击值 A_V/J	换算后的冲击值 A_V/J					
	VGB	梅氏	ISO-V	VSM	ISO-U	Izod
55	281	72	37	64	33	55



附图 1 各种冲击值 A_V 粗略换算

DVM 德国材料试验协会

ISO 国际标准化组织

ISA 国家标准协会国际联合会

VSM 瑞士材料试验协会

(引自: Stahlschlüssel-Taschenbuch, Verlag
Stahlschlüssel Wegst GmbH-D-7142 Marbach/N, 1992)

附表 27 气体中水分、湿度、露点的关系

露点/℃	体积/ $\times 10^{-6}$	21℃时的相对湿度 (%)	露点/℃	体积/ $\times 10^{-6}$	21℃时的相对湿度 (%)
-150	9.2×10^{-12}	—	-62	8.07	0.0323
-140	4.0×10^{-7}	—	-60	10.6	0.0433
-130	9.2×10^{-5}	—	-58	14.0	0.0567
-120	1.3×10^{-4}	5.4×10^{-7}	-56	18.3	0.0738
-118	0.00021	0.0000009	-54	23.4	0.0952
-116	0.00035	0.0000014	-52	31.1	0.126
-114	0.00057	0.0000023	-50	39.4	0.160
-112	0.00091	0.0000049	-48	49.7	0.202
-110	0.00134	0.0000054	-46	63.2	0.257
-103	0.00238	0.0000096	-44	80.0	0.325
-106	0.00369	0.000015	-42	101.0	0.410
-104	0.00566	0.000023	-40	127.0	0.516
-102	0.00855	0.000035	-38	159.0	0.646
-100	0.0130	0.000053	-36	198.0	0.804
-98	0.0197	0.000080	-34	246.0	1.01
-96	0.0290	0.00012	-32	340.0	1.24
-94	0.0434	0.00018	-30	376.0	1.55
-92	0.0632	0.00026	-28	462.0	1.88
-90	0.0928	0.00037	-26	566.0	2.30
-88	0.134	0.00054	-24	691.0	2.81
-86	0.184	0.00076	-22	841.0	3.42
-84	0.263	0.00107	-20	1020.0	4.14
-82	0.352	0.00150	-18	1230.0	5.01
-80	0.526	0.00214	-16	1490.0	6.06
-78	0.747	0.00300	-14	1790.0	7.29
-76	1.01	0.00412	-12	2140.0	8.75
-74	1.38	0.00562	-10	2560.0	10.4
-72	1.88	0.00765	-8	3060.0	12.8
-70	2.55	0.0104	-6	3604.0	14.8
-68	3.44	0.0140	-4	4320.0	17.5
-66	4.60	0.0187	-2	5100.0	20.7
-64	6.10	0.0248	0	6020.0	32.1

附表 28 我国现行热处理技术标准目录

序号	标准编号	标准名称	序号	标准编号	标准名称
1	JB/T3999—1999	钢件的渗碳与碳氮共渗淬火回火	7	JB/T7951—1999	淬火介质冷却性能试验方法
2	JB/T4155—1999	气体氮碳共渗	8	JB/T8929—1999	深层渗碳
3	JB/T4202—1999	钢的锻造余热淬火回火处理	9	JB/T9197—1999	不锈钢和耐热钢热处理
4	JB/T4390—1999	高、中温热处理盐浴校正剂	10	JB/T9198—1999	盐浴硫氮碳共渗
5	JB/T4392—1999	有机物水溶性淬火介质性能测定方法	11	JB/T9199—1999	防渗涂料 技术条件
6	JB/T4393—1999	聚乙烯醇合成淬火剂	12	JB/T9200—1999	钢铁件的火焰淬火回火处理

(续)

序号	标准编号	标准名称	序号	标准编号	标准名称
13	JB/T9201—1999	钢铁件的感应淬火回火处理	42	JB/T6956—1993	离子渗氮 (代替 JB/Z214—84)
14	JB/T9202—1999	热处理用盐	43	JB/T6047—1992	热处理盐浴有害固体废物无害化处理方法
15	JB/T9203—1999	固体渗碳剂	44	JB/T6048—1992	盐浴热处理
16	JB/T9204—1999	钢件感应淬火金相检验	45	JB/T6049—1992	热处理炉有效加热区的测定
17	JB/T9205—1999	珠光体球墨铸铁零件感应淬火金相检验	46	JB/T6050—1992	钢铁热处理零件硬度检验通则
18	JB/T9206—1999	钢件热浸铝工艺及质量检验	47	JB/T6051—1992	球墨铸铁热处理工艺及质量检验
19	JB/T9207—1999	钢件在吸热式气氛中的热处理	48	JB/T6058—1992	冲模用钢及其热处理技术条件
20	JB/T9208—1999	可控气氛分类及代号	49	JB/T5069—1991	钢铁零件渗金属层金相检验方法
21	JB/T9209—1999	化学热处理渗剂 技术条件	50	JB/T5072—1991	热处理保护涂料一般技术要求
22	JB/T9210—1999	真空热处理	51	JB/T5073—1991	热处理车间空气中有害物质的限值
23	JB/T9211—1999	中碳钢与中碳合金结构钢 马氏体等级	52	JB/T5074—1991	低、中碳钢球化体评级
24	JB/T8555—1997	热处理技术要求在零件图样上的表示方法	53	GB/T7232—1999	金属热处理工艺术语
25	JB/T4215—1996	渗硼 (代替 JB4215—86 和 JB4383—87)	54	GB/T17358—1998	热处理生产电能消耗定额及其计算和测定方法
26	JB/T8418—1996	粉末渗金属	55	GB/T16923—1997	钢的正火与退火处理
27	JB/T8419—1996	热处理工艺材料分类及代号	56	GB/T16924—1997	钢的淬火与回火处理
28	JB/T8420—1996	热作模具钢显微组织评级	57	GB/T15735—1995	金属热处理生产过程安全卫生要求
29	JB/T7709—1995	渗硼层显微组织、硬度及层深测定方法	58	GB/T15749—1995	定量金相手工测定方法
30	JB/T7710—1995	薄层碳氮共渗或薄层渗碳钢件显微组织检验	59	GB/T13321—1991	钢铁硬度锉刀检验方法
31	JB/T7711—1995	灰铸铁件热处理	60	GB/T13324—1991	热处理设备术语
32	JB/T7712—1995	高温合金热处理	61	GB/T12603—1990	金属热处理工艺分类及代号
33	JB/T7713—1995	高碳高合金钢制冷作模具显微组织检验	62	GB/T11354—1989	钢铁零件渗氮层深度测定和金相组织检验
34	JB/T7715—1995	冷锻模具用钢及热处理条件	63	GB/T9450—1988	钢铁渗碳淬火有效硬化层深度的测定和校核
35	JB/T4218—1994	硼砂熔盐渗金属 (代替 JB/Z235—85 和 JB4218—1986)	64	GB/T9451—1980	钢件薄表面总硬化层深度或有效硬化层深度的测定
36	JB/T7500—1994	低温化学热处理工艺方法选择通则	65	GB9452—1988	热处理炉有效加热区测定方法
37	JB/T7519—1994	热处理盐浴 (钼盐、硝酸盐) 有害固体废物分析方法	66	GB5617—1985	钢的感应淬火或火焰淬火后有效硬化层深度的测定
38	JB/T7529—1994	可锻铸铁热处理	67	GB/T18177	钢的气体渗氮
39	JB/T7530—1994	热处理用氩气、氮气、氢气一般技术条件	68	JB/T10174—2000	钢铁零件强化喷丸的质量检验方法
40	JB/T6954—1993	灰铸铁件接触电阻淬火质量检验和评级	69	JB/T10175—2000	热处理质量控制要求
41	JB/T6955—1993	热处理常用淬火介质技术要求			

附表 29 日本现行热处理技术标准目录

序号	标准编号	标准名称	序号	标准编号	标准名称
1	JIS B 6905: 1995	金属制品热处理名词术语	30	JIS Z 2201: 1998	金属材料拉伸试样
2	JIS G 0201: 2000	钢铁名词术语 (热处理)	31	JIS Z 2202: 1998	金属材料冲击试样
3	JIS G 0202: 1987	钢铁名词术语 (试验)	32	JIS Z 2241: 1998	金属材料拉伸试验方法
4	JIS G 0203: 2000	钢铁名词术语 (制品和品质)	33	JIS Z 2242: 1998	金属材料冲击试验方法
5	JIS H 0211: 1992	表面清洁处理名词术语	34	JIS Z 2243: 1998	布氏硬度试验——试验方法
6	JIS B 0122: 1978	加工方法标记	35	JIS Z 2244: 2003	维氏硬度试验——试验方法
7	JIS B 6911: 1999	钢铁的正火和退火	36	JIS Z 2245: 1998	洛氏硬度试验——试验方法
8	JIS B 6912: 2002	钢铁的高频加热淬火和回火	37	JIS Z 2246: 2000	肖氏硬度试验——试验方法
9	JIS B 6913: 1999	钢铁的淬火和回火	38	JIS Z 2251: 1998	努氏硬度试验——试验方法
10	JIS B 6914: 2002	钢铁的渗碳及碳氮共渗淬火和回火	39	JIS Z 2252: 1991	高温维氏硬度试验——试验方法
11	JIS B 6915: 1999	钢铁的渗氮和氮碳共渗	40	JIS Z 2340: 2002	渗透探伤和磁粉探伤试验的目视观察条件
12	JIS Z 3700: 1987	焊接后的热处理	41	JIS Z 2343-1: 2001	非破坏性渗透探伤试验—1: 一般通则
13	JIS B 6901: 1998	金属热处理设备——有效加热区和有效处理区测试方法	42	JIS Z 2343-2: 2001	非破坏性渗透探伤试验—2: 渗透探伤剂试验
14	JIS G 0303: 2000	钢材检验通则	43	JIS Z 2343-3: 2001	非破坏性渗透探伤试验—3: 对比试片
15	JIS G 0551: 1998	钢的奥氏体晶粒测试方法	44	JIS Z 2343-4: 2001	非破坏性渗透探伤试验—4: 试验装置
16	JIS G 0552: 1998	钢的铁素体晶粒测试方法	45	JIS Z 8704: 1993	温度测定方法——电气法
17	JIS G 0553: 1996	钢的显微组织测试方法	46	JIS Z 8705: 1992	玻璃温度计测温方法
18	JIS G 0555: 2003	钢中非金属夹杂物的显微镜测试方法	47	JIS Z 8706: 1980	光高温计测温方法
19	JIS G 0556: 1998	钢中发纹的肉眼测试方法	48	JIS Z 8707: 1992	充满式温度计和双金属温度计测温方法
20	JIS G 0557: 1996	钢的渗碳硬化层深度测定方法	49	JIS Z 8710: 1993	温度测定方法通则
21	JIS G 0558: 1998	钢的脱碳层深度测定方法	50	JIS B 7724: 1999	布氏硬度试验——试验机的检定
22	JIS G 0559: 1996	钢的火焰和高频淬火硬化层深度测定方法	51	JIS B 7725: 1997	维氏硬度试验——试验机的检定
23	JIS G 0560: 1998	钢的硫印试验方法			
24	JIS G 0561: 1998	钢的淬透性试验方法 (端淬法)			
25	JIS G 0562: 1993	钢的渗氮层深度测定方法			
26	JIS G 0563: 1993	钢的渗氮层表面硬度测定方法			
27	JIS G 0565: 1992	钢铁材料的磁粉探伤试验方法和磁粉种类			
28	JIS G 0566: 1980	钢的火花鉴别方法			
29	JIS G 0587: 1995	碳素钢和低碳合金钢锻件的超声波探伤方法			

(续)

序号	标准编号	标准名称	序号	标准编号	标准名称
52	JIS B 7726: 1997	洛氏硬度试验——试验机的 检定	58	JIS B 7724: 1999	布氏硬度试验——标准硬 度块的校正
53	JIS B 7727: 2000	肖氏硬度试验——试验机的 检定	59	JIS B 7740: 1999	夏比冲击试验——检定试 验机的标准试样
54	JIS B 7730: 1997	洛氏硬度试验——标准硬度 块的校正	60	JIS C 1601: 1983	热电温度计
55	JIS B 7731: 2000	肖氏硬度试验——标准硬度 块的校正	61	JIS C 1602: 1995	热电偶
56	JIS B 7734: 1997	努氏硬度试验——试验机的 检定	62	JIS C 1603: 1983	电阻温度计
57	JIS B 7735: 1997	维氏硬度试验——标准硬度 块的校正	63	JIS C 1604: 1997	测温电阻
			64	JIS C 1605: 1995	铠装热电偶
			65	JIS C 1610: 1995	热电偶用补偿导线
			66	JIS K 0151: 1983	红外线气体分析仪

附表 30 与热处理行业有关的环境—安全法令

- EPA's Resource Conservation and Recovery Act(RCRA)-Hazardous Waste
 - EPA's SARA Title III -Hazardous Chemicals
 - EPA's Underground Storage Tank (UST)Program
 - EPA's Aboveground Storage Tank(AST)Program
 - EPA's Clean Water Act(CWA)-Wastewater
 - EPA's Clean Air Act(CAA)-Air Pollution
 - EPA's Stormwater Discharge Regulations(SW)
 - EPA's Spill Prevention Control and Countermeasure Plan(SPCC)-Oil Storage
 - EPA's Used Oil Management Regulations(UOM)
 - EPA's Vapor Degreaser Regulation
 - OSHA's Hazard Communication Standard(HCS, Right-To-Know)
 - OSHA's In-Plant Air Quality Standards
 - OSHA's Lockout/Tagout Regulations(LO/TO)
 - OSHA's Confined Space Entry Regulations(CSE)
 - OSHA's HAZWOPER Regulations
 - OSHA's Lab Safety Plan(LS)
 - OSHA's Respirator Maintenance Program(RMP)
 - OSHA's Process Safety Management Regulations(PSM)
 - OSHA's Bloodborne Pathogens Standard(BBP)
 - OSHA's Emergency Response Plan(ERP)
 - OSHA's Personal Protection Equipment(PPE)Standard
 - OSHA's General Safety Regulations
- OSHA-Occupational safety and Health Administration
- EPA-Environmental Protection Agency
- SARA-Superfund Amendments and Reauthorization Act
- CERCLA-Comprehensive Environmental Response Compensation and liability Act
- SERCS-state emergency response commissions
- LEPCS-local emergency planning committees

附表 31 美国环保局 (EPA) 环保要求法规一览表

EPA Regulation	Requirement ^①
1. Hazardous Waste (RCRA)	Contingency plan Training Safety equipment Labeling
2. SARA Title III	Hazardous substance list Tier II Form R
3. Clean Water Act	Permits
4. Underground Storage Tanks	Tank Registration Leak detection Spill/overflow Control Recordkeeping Financial responsibility
5. Clean Air Act (CAA)	Emissions estimates Permits Emissions controls
6. CAA Accident Prevention	Written program Hazard analysis procedures Training program
7. Stormwater (SW)	Sampling procedures Permitting SW pollution prevention plan
8. Spill Prevention/Control (SPCC)	Written Plan Training
9. Used Oil Management	Preparation/prevention procedures Contingency plan Labeling Recordkeeping Biennial report
10. Vapor Degreasers	Register degreaser with EPA/State Upgrade degreaser with required modifications Comply with emissions limitations
RCRA-Resource Conservation and Recovery Act	
TSD-treatment, storage, and disposal	
DOT-Department of Transportation	
EPCRA-Emergency Planning and Community Right-to Know Act	
NPDES-National Pollutant Discharge Elimination System	
POTWS-publicly owned treatment works	
SPCC-Spill prevention Control and Countermeasure	

① Note: Partial list, requirements concerning written programs, training and equipment shown.

附表 32 美国职业安全卫生署 (OSHA) 法规

1. Hazard Communication Standard	Written program
	MSDS file
	Hazardous substance list
	Labeling
	Training program
2. Lockout/Tagout	Written program
	LO/TO equipment
	Training program
3. Confined Space Entry	Written program
	Entry Permit
	Training program
	CSE equipment
	CSE signs
4. In-Plant Air	Sampling
	Safety equipment
	Engineering controls
5. Process Safety Management	Written program
	Hazard analysis procedures
	Training program
6. Respiratory Protection	Written procedures
	Respiratory protection equipment
7. Emergency Response Plan	Written program safety equipment
8. Bloodborne Pathogens	Written program
	Training program
	Safety equipment
9. HAZWOPER	Written program
	Training
	Safety equipment
	Labeling
10. Lab Safety	Chemical hygiene plan
	Training
11. Personal Protection Equipment	Conduct in-plant hazard analysis
	Identify PPE needs
	Conduct employee training

附表 33 与热处理有关的国际组织、术语、法规的缩写和代号

A.S.	Australian Standard Specification
AA	Aluminium Association
AAR	Association of American Railroads
AASHO	American Association of state Highway officials
ABCQ	Associação Brasileira de Controle de Qualidade
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	American Bureau of shipping
ACI	Alloy Casting Institute
AD	Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter
AEC	Atomic Energy Commission
AECMA	Association Européenne des constructeurs de Matériel Aerospatial, Paris
AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
AFNOR	Association Française de Normalisation
AFNOR—	Association Française de Normalisation
AFW	Akademie für Führungskräfte der Wirtschaft e.V.
AGA	American Gas Association
AIEE	American Institute of Electrical Engineers
AISE	Association of Iron and Steel Engineers
AISI	American Iron and Steel Institute
ANP	Ausschuß Normenpraxis im DIN
ANSI	American National Standards Institute
API	American Petroleum Institute
APM	Advanced Powder Metallurgy
APP	Accident Prevention Program (EDA)
ARSO	African Regional Standards Organization
ASA	American Standard Association
ASM	American society for Metals
ASME	American Society of Mechanical Engineering
ASMO	Arab Organization for standardization and Metrology
ASRE	American Society of Refrigeration Engineers
ASSAB	Associated Swedish Steel AB
ASTM	American Society for Testing and Materials
ASTM	Aboveground Storage Tank
AWF	Ausschuß für Wirtschaftliche Fertigung e.V.
AWS	American Welding Society
AWV	Ausschuß für Wirtschaftliche Verwaltung e.V.

(续)

BC	British cooperation Register
BCIRA	British cast Iron Research Association
BDS	Bulgarische Norm
BIBB	Bundesinstitut für Berufsbildung
BS	British Standard
BS (1)	British Standards (Institution)
BSI	British Standards Institution
BV	Bureau Veritas, Paris
BWB	Bundesamt für Wehrtechnik and Beschaffung
BWG	Birmingham Irlive Gauge
CAA	Clean Air Act (EPA' s-Air Pollution)
CARICOMCO	Caribbean common Market Standards council
CAS	Normenorganisation der Volksrepublik China
CCITB	China Commodity Inspection and Testing Bureau
CDA	Copper Development Associtaion
CEN	Europäisches komitee für Normung (comite Européen de Normalisation)
CENIM	Centro Nacional de Investigaciones Metalurgicas
CERCLA	Comprehensive Enuiromental Response Compensation and Leability ACT
CERN	Conceil Européen pour la Recherche Nucleaire
CHT	Computerized Heat Treatment
CHTA	China Heat Treatment Associetion
CHTbf	Computerized Heat treatment planning systems for batch furnaces
CHTef	computerized Heat Trealtment planning systems for continuous furnaces
CHTE	Center for Heat Treating Excellence
CHTS	China Heat Treatment Society
CI	Cast Iron
CMEA	Council for Mutual Economic Assistance
COLIME	Comité de liaison des Industries Metalliques Européenes
COPANT	Pan American Standards Commission
CS	Commercial Standard
CSA	Canadian standard Association
čSN	Tschechoslowakische Norm
CTCHTC	Standardisation Technical Commission for Heat Treatment of China
CWA	Clean Water Act (EPA' s-Weslewater)
DEK	Deutsche Echtheitskommission
DGOR	Deutsche Gesellschaft für Operations Research

(续)

DGQ	Deutsche Gesellschaft für Qualität
DIN	Deutsche Industria Norm
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V
DNA	Deutscher Normenausschuß
DOT	Department of Transportation
DS	Dansk Standardiseringsraad
DUE-OIT	U.S. Department of Energy-Office of Industrial Technology
DVM	Deutscher Verband für Materialprüfung
DVS	Deutscher Verband für Schweißtechnik e. V.
EGKS	Europäische Gemeinschaft für Kohle and Stahl
EIA	Electronic Industries Association
EMTEC	Edison Material Technology Center
EN	European Norm
EN	Europäische Norm
EOS	Ägyptische Normenorganisation
EPA	Environmental Protection Agency
EPCRA	Emergency Planning and Community Right to Know Act
EPRI	Electric Power Research Institute (Palo Alto, Calif.)
ESC	Energy Solution Center Inc. (Washington)
ESI	Äthiopisches Normeninstitut
ESU	Electroschlacke-Umschmelzverfahren
EU	EURONORM
FIA	Forging Industry Association
GAEB	Gemeinsamer Ausschuß, "Elektronik im Bauwesen"
GIC	Gray Iron Casting
GL	Germanischer Lloyd
GOST	Gosudarstvenny Standart (Russia)
GTI	Gas Technology Institute
GTZ	Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit
HIP	Hot Isostatic Pressing
HSLA	High-Strength Low-Alloy (Steel)
HTS	Heat Treating Society, ASM
IBN	Institut Belge de Normalisation
ICI	Imperial Chemical Industries
IEC	(Internationale Electrotechnische Kommission)
IFHTSE	International Federation of the National Standardizing Associations

(续)

IHEA	Industrial Heating Equipment Association (Cincinnati)
INMETRO	Instituto de Metrologia Normalização e Qualidade Industrial (Brasilien)
INPM	Instituto de pesos e Medidas (Brasilien)
IQ	Intensive quenching
IRE	Institute of Radio Engineers
IRS	Indian Railway Specification
ISA	International Federation of the National Standardizing Associations
ISI	Indian Standards Institution
ISO	International Organization for Standardization
ISO	International Standard Organisation
IVBH	Internationale Vereinigung für Brücken und Hochbau
IWG	Imperial wire Gauge
IWT	Institut für Werkstoff-Technik
JAN	Joint Army-Navy Specification
JIS	Japanese Industrial Standard
JIS	Japanese Industrial Standard
JSA	Japanese standard Association
JUS	Jugoslawische Norm
KBS	Kenya Bureau of Standards
KS	Korean standard
LEPCs	Local Emergency Planning Committees
LR	Lloyd's Register of shipping
LSG	Legal Standard Gauge (= IWG)
LW	Werkstoff-Handbuch der Deutsche Luftfahrt
LWG	Legal Wire Gauge (= IWG)
M	Siemens-Martin-Stahl, Siemens-Marlin-Verfahren
MAE's	Microalloying Elements
Mat-A	Materialamt der Bundeswehr
MIC	Ministerio da Industria e do Comercio (Brasilien)
MIL	Military Specification, Washington
MNC	Metallnormcentralen
MSZ	Ungarische Norm
MTI	Metal Treating Institute
NACE	National Association of Corrosion Engineers
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NB	Nom Bore (= Nennweite)

(续)

NBN	Nominal Belges Normalisées
NBS	National Bureau of Standards
NCMS	National Center for Manufacturing Science
ND	Nenndruck
NEMA	National Electrical Manufacturer Association
NEN	Norm des Nederlands Normalisatie-Institut
NF	Norm Française
NF—	Normes Françaises
NNI	Nederlands Normalisatie Institut
NOP	Schweizerische Normenpraxis
NPDES	National Pollutant Discharge Elimination System
NSF	Norges standardiseringsforbund
NSO	Nigerianische Normenorganisation
NV	Det Norske Veritas
NW	Nennweite
öNORM	Norm des Österreichischen Normungsinstituts
OSHA	Occupational safety and Health Administration
PASC	Pacific Area standards Congress
PN	Polnische Norm
PNNI	Pacific Northwest National Laboratory (DOE, Richland, Washington)
POTWs	Publicly Owned Treatment Works
QQ-S	Federal Specification, Washington
RAL	Ausschuß für Lieferbedingungen und Gütesicherung beim DNA
RCRA	Resource Conservation and Recovery Act (EPA's Program)
REFA	Verband für Arbeitsstudien e. V.
RKW	Rationalisierungskuratorium der Deutschen Wirtschaft
RTMA	Radio-Electronics-Television Manufacturers Association
SAA	Standards Association of Australia
SAE	American society of Automotive Engineers
SAE	Society of Automotive Engineers
SALA	Superfund Amendments and Reau
SERCs	State Emergency Response Commissions
SEW	Stahl-Eisen-Werkstoffblatt
SFS	Suomen Standardisoimisliittori. y.
SI	Internationales Einheitssystem
SINMETRO	Sistema Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade industrial (Brasilien)

(续)

SIS	Svensk Industri standard
SIS	Sensk Industrie Standard
SME	Society of Manufacturing Engineers
SNCF	Société Nationale des chemins de Fer (France)
SPCC	Spill Prevention Control and Countermeasure
SS	Svensk Standard
STAS	Rumanisch Norm
SWG	Imperial Standard wire Gauge (= 1WG)
TBS	Tanzania Bureau of standards
TGL	DDR-Norm
TI	Tube Investment
TL	Technische Lieferbedingungen
TLDB	Technische Lieferbedingungen der Deutschen Bundesbahn
TMCA	Titanium Metals Corporation of America
TPTC	Thermal Processing Technology Center
TSD	Treatment, Storage and Disposal
TÜV	Technischer Überwachungsverein
UEAtc	Europäische Union für technische Zulassungen
UIC	Union Internationale des chemins de Fer (Internationaler Eisenbahnverband)
UNE	Spanische Norm
UNI	Unificazione Italiana (Ente Nazionale Italiano di Unificazione)
UNS	Unified Numbering System of Metals and Alloys
UNS	Unified Numbering System
UNSIDER	Sezione DIUNIFICAZIONE SIDERURGICA (Italien)
UOM	Used Oil Management (EPA's Regulations)
UST	Underground Storage Tank
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDE	Verband Deutscher Elektrotechniker
VDEh	Verein Deutscher Eisenblechleute
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verein Deutscher Maschinenbau-Anstalten
VdTÜV	Vereinigung der Technischen Überwachungsvereine
Wbl	Werkstoffblatt
WW	Werkstoff-Handbuch der Wehrtechnik
ZDA	Zinc Development Association, London
ZMD	Zentralstelle für Maschinelle Dokumentation
ГОСТ	Государственный стандарт International Electrotechnical Committee

附表 34 常用符号

1. 铸铁件热处理代号 (GB/T5614—1985)		代号	热处理状态名称
代号	热处理状态名称	H _{u1}	氮化态
T	退火态	H _{u2}	软氮化态
T ₁	高温石墨化退火态	H _{u3}	渗硼态
T ₂	低温石墨化退火态	<div>注：铸铁件热处理状态代号示例： <div>HT200 (S₁) └───┬───┐ └───┘人工时效态的代号 灰铸铁牌号</div></div>	
Zh	正火态		
Z ₁	完全奥氏体化正火态		
Z ₂	低碳奥氏体化正火态		
Z ₃	部分奥氏体化正火态	2. 铸钢件热处理状态的名称及代号 (GB/T5615—1985)	
C	淬火态	代号	热处理状态名称
C ₁	完全奥氏体化淬火态	Z	铸态
C ₂	低碳奥氏体化淬火态	T	退火态
C ₃	部分奥氏体化淬火态	Q	去除应力退火态
H	回火态	J	均匀化退火态
H ₁	高温回火态	W	稳定化处理态
H ₂	中温回火态	Zh	正火态
H ₃	低温回火态	C	淬火态
S	时效态	H	回火态
S ₁	人工时效态	Ch	沉淀硬化态
S ₂	自然时效态	G	固溶热处理态
Z	铸态	3. 变形铝及铝合金的基础状态代号 (GB/T16475—1996)	
D	等温淬火态	代号	名 称
D ₁	完全奥氏体化等温淬火态	F	自由加工状态
D ₂	低碳奥氏体化等温淬火态	O	退火状态
D ₃	部分奥氏体化等温淬火态	H	加工硬化状态
D _{1.1}	完全奥氏体化上贝氏体等温淬火态	W	固溶处理状态
D _{1.2}	完全奥氏体化下贝氏体等温淬火态	T	热处理状态 (不同于 F、O、H 状态)
D _{2.1}	低碳奥氏体化上贝氏体等温淬火态		
D _{2.2}	低碳奥氏体化下贝氏体等温淬火态	4. 变形铝及铝合金的原状态代号相应的新代号 (GB/T16475—1996)	
D _{3.1}	部分奥氏体化上贝氏体等温淬火态	新代号	旧代号
D _{3.2}	部分奥氏体化下贝氏体等温淬火态	O	M
B	表面淬火态	H112 或 F	R
B ₁	火焰加热表面淬火态	HX8	Y
B ₂	感应加热表面淬火态	HX6	Y1
B _{2.1}	高频感应加热表面淬火态	HX4	Y2
B _{2.1}	中频感应加热表面淬火态	HX2	Y4
B ₃	电接触加热表面淬火态	HX9	T
H _u	化学热处理态		

(续)

新代号		旧代号	状态代号	说 明
T4		CZ	T5	由高温成形过程冷却, 然后进行人工时效的状态
T6		CS		
TX51、TX52 等		CYS	T6	固溶处理后进行人工时效的状态
T0		CZY	T7	固溶处理后进行过时效的状态
T9		CSY	T8	固溶处理后经冷加工, 然后进行人工时效的状态
T62		MCS		
T42		MCZ	T9	固溶处理后人工时效, 然后进行冷加工的状态
T73		CGS1		
T76		CGS2	T10	由高温成形过程冷却后, 进行冷加工, 然后人工时效的状态
T74		CGS3		
T5		RCS	注: 热处理工艺代号新标准 (GB/T12603—1990) 用数字表示, 如“气体渗碳”用“5311G”表示, 等。	
5. 变形铝及铝合金的 TX 细分状态代号 (GB/T16475—1996)			6. 铸造方法代号	
状态代号	说 明		代号	意 义
T0	固溶处理后、经自然时效再通过冷加工的状态		S	砂型铸造
T1	由高温成形过程冷却, 然后自然时效至基本稳定的状态		K	壳型铸造
			J	金属型铸造
T2	由高温成形过程冷却, 经冷加工后自然时效至基本稳定的状态		R	熔模铸造
			Li	离心铸造
T3	固溶处理后进行冷加工, 再经自然时效至基本稳定的状态		La	连续铸造
			F	铸态
T4	固溶处理后自然时效至基本稳定的状态		B	变质处理

参 考 文 献

- [1] 航空制造工程手册总编委会主编. 航空制造工程手册: 热处理卷 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1993.
- [2] 机械工程手册、电机工程手册编委会. 机械工程手册: 第7卷机械制造工艺(一) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [3] 林慧国等编. 世界钢号手册. 3版 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [4] George E. Totten, Maurie A.H. Howes. Steel Heat Treatment Handbook [M]. Marcell Dekker, Inc. 1997.
- [5] American Society for Metals. Metals Handbook [M]. 9th Edition, Vol4, Heat Treating, 1981.
- [6] American Society for Metals. Metals Handbook [M]. Desk Edition, 1985.
- [7] 中国机械工程学会热处理专业学会编. 热处理手册: 第1卷. 第3版 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [8] American Society for Metals. Metals Handbook [M]. 8th Edition, Vol8, 1977.
- [9] 中国机械工程学会热处理学会编. 热处理手册: 第4卷. 第3版. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [10] 樊东黎, 徐跃明, 佟晓辉等编. 热处理工程师手册. 2版 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [11] 第一汽车制造厂设备修造分厂生产组编. 机械工程材料手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [12] 中国机械工程学会热处理专业学会编. 热处理手册: 第2卷. 3版 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [13] 冶金工业部《合金钢手册》编写组编. 合金钢手册: 第1~6册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1983.
- [14] 《可控气氛热处理》编写组编. 可控气氛热处理—应用与设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [15] 中国机械工程学会铸造专业学会编. 铸造手册. 第1卷 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [16] 徐进等编. 模具钢 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
- [17] 康大韬等编. 大型锻件材料及热处理 [M]. 北京: 龙门书局, 1998.
- [18] 第一汽车制造厂, 长春汽车材料研究所编. 机械工程材料手册: 黑色金属材料卷 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [19] 胡志忠. 钢及其热处理曲线手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.
- [20] 冯晓曾等编. 模具用钢和热处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.
- [21] 孙一唐等译. 金属和合金的化学热处理手册 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986.
- [22] 曲敬信等编. 表面工程手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.